

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Leon Malnar**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Leon Malnar

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Željku Šitumu na svojoj pomoći vezanu uz završni rad i stricu Vladimiru na uslugama tokarenja. Također se želim zahvaliti roditeljima Filipu i Ireni na podršci tijekom cijelog studiranja, te svim prijateljima i kolegama.

Leon Malnar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **LEON MALNAR**

Mat. br.: 0035199068

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**PROJEKTIRANJE, IZRADA I UPRAVLJANJE TROOSNOG  
ANTROPOMORFNOG ROBOTA ZA IGRANJE ŠAHA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**DESIGN, MANUFACTURING AND CONTROL OF A 3-AXIS  
ANTHROPOMORPHIC CHESS-PLAYING ROBOT**

Opis zadatka:

Šah je jedna od najpopularnijih igara na svijetu, koja impresionira jednostavnošću pravila, a istovremeno svojom složenošću i nevjerojatnim brojem mogućih poteza i pozicija koje se za vrijeme jedne partije mogu pojaviti. Brojna istraživanja ukazuju da sustavna šahovska poduka kod mlađih osoba može utjecati na razvoj kognitivnih sposobnosti, poboljšanja pamćenja, vizualnih sposobnosti i opće inteligencije. Suvremena računalna tehnologija otvorila je nova područja u igranju šaha i produbila raspravu o umjetnoj inteligenciji nasuprot ljudskoj. Intenzivan razvoj suvremene robotike i sveopća prisutnost automatiziranih procesa u svijetu doveo je i do izrade robotiziranih strojeva za zamjenu čovjeka u igranju ove drevne igre. Izrada ovakvog sustava, za čiju realizaciju su potrebna interdisciplinarna znanja iz različitih područja, može voditi ka dodatnoj popularizaciji ove igre u studentskoj populaciji, a može služiti i za edukaciju iz propulzivnog područja mehatronike i robotike.

U radu je potrebno:

- konstruirati robotsku ruku prema dimenzijama šahovske ploče s ugrađenom prihvatnicom za figure
- projektirati šahovsku ploču s ugrađenim senzorima za detekciju položaja figura i sučeljem za povezivanje s upravljačkim sustavom
- izraditi potrebne dijelove i sastaviti cijeli sustav u funkcionalnu cjelinu
- izvesti kinematički model robota potreban za upravljanje gibanjem
- izraditi upravljački program i ispitati rad sustava.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. PROJEKTIRANJE SUSTAVA .....	5
2.1. Odabir komponenti .....	6
2.2. Konstruiranje figura i hvataljke .....	10
2.3. Konstruiranje glavnog nosača .....	16
2.4. Konstruiranje segmenata i poluga.....	19
3. IZRADA I SKLAPANJE DIJELOVA ROBOTA.....	22
4. PRORAČUN KINEMATIKE .....	27
4.1. Proračun direktne kinematike .....	28
4.2. Proračun inverzne kinematike.....	32
5. MJERNI UREĐAJI I IMPLEMENTACIJA .....	36
5.1. Shema spajanja komponenti.....	36
5.2. Izrada ploče sa senzorima .....	38
5.3. Implementacija.....	40
6. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42
PRILOZI.....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Pasivni zglobovi s različitim stupnjevima slobode .....	1
Slika 2.	Strukture komercijalnih industrijskih robota.....	2
Slika 3.	Primjer industrijskog paletizirajućeg robota ABB IRB 460 .....	3
Slika 4.	Vijčani spoj za namještaj.....	6
Slika 5.	Prikaz spojnice u presjeku .....	6
Slika 6.	Signal za upravljanje motorom.....	8
Slika 7.	Mogućnosti prihvaćanja radijalnih i sfernih objekata .....	11
Slika 8.	Kinematički modeli hvataljki sa 6 rotacijskih zglobova i 1 ili 2 linearna zglobova .	12
Slika 9.	Odabrani mehanizam hvataljke .....	12
Slika 10.	Izgled siluete figura .....	13
Slika 11.	Bočni prikaz šahovskih figura .....	13
Slika 12.	Model držača figura.....	14
Slika 13.	Izgled zatvorene (lijevo) i otvorene (desno) hvataljke .....	15
Slika 14.	Model sklopa hvataljke .....	16
Slika 15.	Prikaz širina dijelova robota.....	17
Slika 16.	Prikaz načina prijenosa rotacije glavnog nosača .....	18
Slika 17.	Model gotovog glavnog nosača.....	19
Slika 18.	Bočni prikaz dijelova segmenata.....	20
Slika 19.	Prikaz gotovog modela robota u različitim položajima.....	21
Slika 20.	Raspored dijelova na pripremi za lasersko rezanje .....	22
Slika 21.	Sklop dijelova izrađenih tokarenjem i glodanjem.....	23
Slika 22.	Printana držala za figure.....	24
Slika 23.	Izrada figura preslikavanjem siluete.....	24
Slika 24.	Izgled gotove robotske ruke i figura.....	26
Slika 25.	Prikaz solidificiranih dijelova sustava.....	27
Slika 26.	Bočni prikaz s glavnim dimenzijama .....	28
Slika 27.	Prikaz upravljivih stupnjeva slobode .....	30
Slika 28.	Shematski prikaz položaja u pomaku .....	33
Slika 29.	Planarni shematski prikaz položaja u pomaku .....	34
Slika 30.	Trokut za analizu unutarnjih koordinata .....	34
Slika 31.	Više prekidača, jedan izlaz .....	37
Slika 32.	Primjer ghosting-a kod matričnog spajanja prekidača .....	37
Slika 33.	Shema matričnog povezivanja senzora. ....	38
Slika 34.	Gornja strana ploče sa senzorima .....	39
Slika 35.	Donja strana ploče sa senzorima .....	39
Slika 36.	Spajanje komponenti na upravljačku jedinicu.....	40

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci promatranih motora.....	7
Tablica 2. Karakteristike motora TowerPro MG996R.....	8
Tablica 3. Karakteristike linearnog elektromagnetskog aktuatora JF-0730B .....	9
Tablica 4. Dimenzije i količina cilindričnih šipki s navojem.....	23

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 1      Unutarnji dio glavnog nosača
- 2      Vanjski dio glavnog nosača



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$b_h$	[mm]	Širina hvataljke
$b_{s1}$	[mm]	Širina segmenta 1
$b_{s2}$	[mm]	Širina segmenta 2
$d_m$	[mm]	Udaljenost ravnine za montažu motora od osi rotacije
$L_{s1}$	[mm]	Duljina segmenta 1
$L_{s2}$	[mm]	Duljina segmenta 2
$L_n$	[mm]	Visina glavnog nosača
$L_{hy}$	[mm]	Udaljenost držala figure od zgloba na hvataljci po osi y
$L_{hz}$	[mm]	Udaljenost držala figure od zgloba na hvataljci po osi z
$p_x$	[mm]	Vanjska koordinata x prihvata figure
$p_y$	[mm]	Vanjska koordinata y prihvata figure
$p_z$	[mm]	Vanjska koordinata z prihvata figure
$q_1$	[rad]	Kut zakreta motora 1
$q_2$	[rad]	Kut zakreta motora 2
$q_3$	[rad]	Kut zakreta motora 3

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je dati potpuno rješenje robota za igranje šaha koje obuhvaća konstruiranje, izradu mehaničkih dijelova, sklapanje, odabir i povezivanje adekvatnih senzora te povezivanje komponenti s upravljačkim sustavom. Ideja je da izrađeni robot mora na temelju poteza koje napravi njegov suparnik generirati najbolji potez i samostalno ga izvršiti. To igru čini interaktivnom i daje mogućnost igranja protiv računala uz pomicanje fizičkih figura kao protiv čovjeka. Kako bi se ostvarili ti zahtjevi, robot mora u svakom trenutku znati točnu poziciju svih figura na ploči da na temelju toga može izvršiti najbolji potez. Svako polje mora imati pridruženu koordinatu u odnosu na koordinatni sustav robota. Da bi se ostvarilo linearno gibanje hvataljke robota, potrebno je poznavati njegovu kinematičku strukturu.

U uvodnom dijelu će se dati pregled različitih struktura robota i odabrat će se glavni aspekti robota koji uključuju načine prijenosa gibanja i tehnologije izrade. Potom će se izraditi model robota s kinematičkim vezama u programu Catia. Nakon izrade slijedi proračun kinematike uz korištenje MATLAB-a. Kako je razvoj ploče i mjernih uređaja donekle neovisan o razvoju samog robota, u zasebnom poglavlju će se prikazati projektiranje i izrada tog dijela sustava. Na kraju će se svi dijelovi povezati u funkcionalnu cjelinu i ispitati rad sustava.

Ključne riječi:

robot, šah, upravljanje, kinematika, senzori, mehatronika

## **SUMMARY**

The aim of this final paper to give a complete solution for a chess playing robot which includes design, manufacturing of mechanical components, assembly, selecting and connecting appropriate sensors, and linking components to the control system. Basic idea is that the aforementioned robot has to generate the best possible move according to the move its opponent just made. It makes the game interactive and gives possibility of playing chess versus a computer through actual physical movement, like an actual human would do. In order to meet those requirements, the robot must be capable of knowing the exact position of every figure on the board so that the best move can be made. Each field must have an associated coordinate relative to the coordinate system of the board. To achieve linear motion of the robot gripper, its kinematic structure has to be known. The introductory section will give an overview of the various robotic structures and the main aspects of the robot will be selected, which include motion transmission and manufacturing processes. After manufacturing is completed, robot kinematics model will be calculated using MATLAB. Due to the fact that the development of the chess board and measuring devices is somewhat independent of the robot development itself, a separate chapter will further show the design and manufacturing process of that part of the system. Finally, all of the parts would be connected to a functional unit and the system operation will be verified.

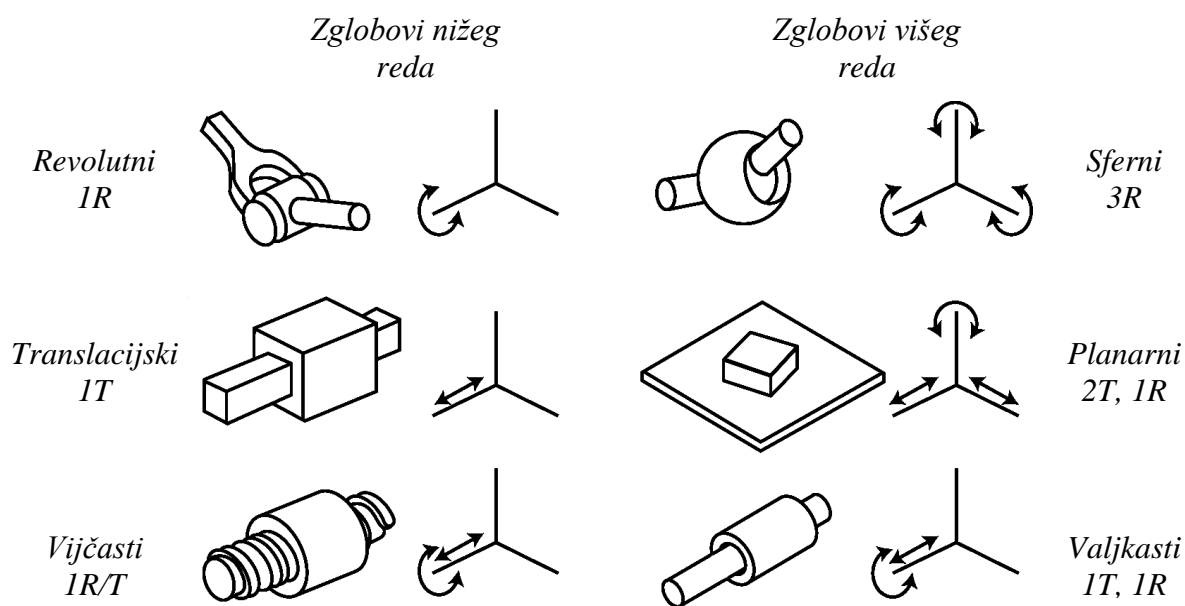
Key words: robot, chess, control, kinematics, sensors, mechatronics

## 1. UVOD

Robotika je dio inženjerske znanosti kojoj primjena sve više izlazi iz okvira industrijske primjene. Roboti se već sad koriste u svemirskim istraživanjima, u okruženjima opasnim za čovjeka u medicini, ali sve više nalaze primjenu i u svakodnevnom životu ljudi. Smatra se da je budućnost robotike upravo u humanoidnim i antropomorfnim robotima koji ostvaruju interakciju s ljudima. Jedna od primjena interakcijskih robota u svrhu zabave je upravo robot s mogućnošću igranja šaha.

Kad je na Grand Prix natjecanju u Londonu 1994. računalo s novim Intel Pentium procesorom prvi put pobijedilo šahovskog velemajestora Garija Kasparova, poteze koje je generiralo računalo je izvršavao operater. Iz toga je nastala motivacija za izradu sustava koji bi omogućavao korisniku da igra šah protiv robota na isti način kao što igra protiv čovjeka.

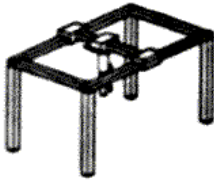


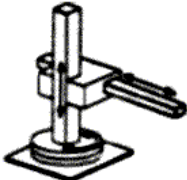


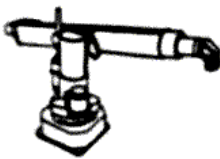


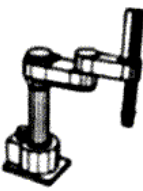
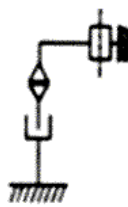




Da bi se započeo razvoj takvog sustava, potrebno je prvo napraviti pregled struktura robota. Strukture ovise o kombinaciji zglobova robota. Slika [1] prikazuje različite izvedbe pasivnih zglobova.



**Slika 1. Pasivni zglobovi s različitim stupnjevima slobode**

Slovo R označava rotacijski, a slovo T označava translacijski stupanj slobode gibanja. Kvaliteta zgloba ovisi najviše o njegovoj krutosti, tj. otporu prema nepoželjnom gibanju. Sa stajališta krutosti, kao i s konstrukcijskog stajališta, pogodno je koristiti zglobove nižeg reda. Slobodno tijelo u prostoru može imati ukupno 6 stupnjeva slobode gibanja, i time mu je u potpunosti

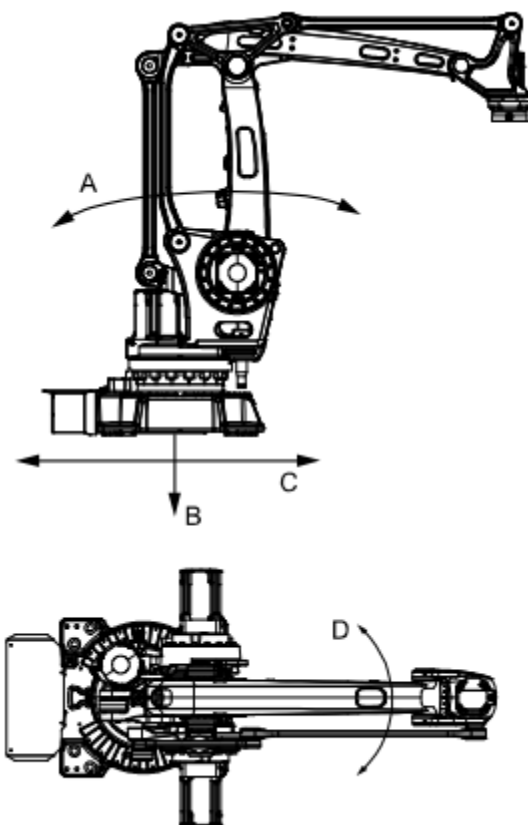
definirana pozicija i orijentacija. Da bi robot mogao doći u svaku točku unutar svog radnog prostora, potrebna su bar 3 stupnja slobode gibanja. Koristeći translacijske i rotacijske zglobove, postoji 12 konfiguracija robota s 3 stupnja slobode gibanja koji su korisni i različiti, a među njima postoji 5 vrsta koji imaju primjenu u komercijalnim industrijskim robotima, a prikazani su na slici 2.

	<i>Princip rada</i>	<i>Kinematička struktura</i>	<i>Radni prostor</i>
<i>Kartezijeva struktura TTT</i>			
<i>Cilindrična struktura RTT</i>			
<i>Sferna struktura RRT</i>			
<i>SCARA struktura RRRT</i>			
<i>Revolutna struktura RRR</i>			

**Slika 2. Strukture komercijalnih industrijskih robota**

Svaka struktura ima svoje prednosti i mane. Općenito se može reći da su strukture s rotacijskim zglobovima konstrukcijski jednostavnije i brže od translacijskih, ali imaju zato složenije programiranje gibanja. Za prihvat šahovske figure nije dovoljno samo doći do točke u prostoru gdje se ona nalazi, potrebno je da je orijentacija hvataljke takva da ne narušava poziciju ostalih

figura, tj. da može sigurno prići svakom polju. Da bi se izbjeglo korištenje translacijskih stupnjeva slobode i da bi se robot učinio maksimalno antropomorfnim bez dodavanja redundancijskih stupnjeva slobode, odabrana je revolutna struktura robota. Kod te strukture robota orijentacija šake obično ovisi o orijentaciji drugog segmenta ruke. Da bi se postigao uvjet vertikalnosti hvataljke u cijelom području rada, robot će imati dodatni mehanizam koji radi na principu dvostrukog paralelograma. U daljnjem tekstu će se za opisivanje tog mehanizma koristiti akronim MDP (Mehanizam Dvostrukog Paralelograma). Na slici 3 je prikazana takva struktura robota na primjeru industrijskog paletizirajućeg robota ABB IRB 460.



**Slika 3. Primjer industrijskog paletizirajućeg robota ABB IRB 460**

Postavlja se pitanje na koji način će takav robot znati igrati šah. U vrijeme izrade ovog rada su najbolji bazični softveri za igranje redom Stockfish, Houdini, Komodo, Deep Shredder i Fire. Ne samo da je Stockfish trenutno najbolji, još je njegova velika prednost ta što je dostupan otvoreni izvorni kod. Može se pokrenuti na operativnim sustavima Windows, OS X ili Linux. Zbog malih dimenzija i praktičnosti, odabrana upravljačka jedinica koja će biti zadužena za upravljanje cijelim sustavom je Raspberry Pi 3. To je malo računalo na jednoj tiskanoj pločici koje je napravljeno s namjerom da se potakne razvoj računalnih znanosti u zemljama u razvoju. Podržava više Linux operativnih sustava, a proizvođači preporučuju Raspbian koji je baziran

na Debianu. Raspberry ima dobru podršku sa programskim jezikom Python pa će se softver razvijati u njemu. Također, postoji već nekoliko gotovih knjižnica za implementaciju Stockfisha u Python što dodatno olakšava situaciju.

## 2. PROJEKTIRANJE SUSTAVA

Da bi se moglo započeti projektiranje potrebno je prvo odrediti generalne smjernice kojih će se trebati pridržavati tijekom konstruiranja. To se najviše odnosi na tehnologije izrade i korištene materijale.

Od brojnih tehnologija izrade dijelova, one koje su autoru u vrijeme projektiranja najdostupnije i najjeftinije su redom: glodanje, rezanje laserom, tokarenje i FDM printanje. Pošto je masa figura koju robot mora podići praktički zanemariva, nije potrebno konstruirati robota s velikom nosivošću. Samim time, povećanjem mase dijelova je potrebno odabrati jače, a samim time i skuplje motore. Očito je masa jedan od ključnih aspekata kod projektiranja ovakve dinamičke konstrukcije pa se izbor glavnog materijala smanjuje na aluminij i polimerne materijale. Prednosti polimera su njihova mala gustoća te jednostavnost i brzina izrade 3D printanjem. Prednosti aluminijske su veća krutost i čvrstoća, mogućnost kvalitetnije obrade i vizualni dojam, a uz to se korištenjem aluminijske lakše naprave revolucionarni zglobovi. Zato je kao glavni konstrukcijski materijal odabran aluminij, a printani polimer će se upotrijebiti samo za izradu dijelova složene geometrije.

Potrebno je još odabrati tehnologiju izrade. Kod izrade će nedvojbeno biti potrebno tokarenje i glodanje, ali nastojat će se da se većina dijelova ipak izradi laserskim rezanjem zbog jednostavnosti i brzine isporuke. Debljina aluminijske ploče koja se koristi je isto jedan od parametara koje treba znati na početku projektiranja jer će puno dimenzija ovisiti o tome. Korištenjem tanje ploče se dobiju dijelovi manje mase, dok se korištenjem deblje dobije veća fleksijska krutost. Odabrana je debljina ploče od 3 mm zbog toga što je to dovoljno tanko da ne povećava značajno masu, a opet dovoljno čvrsto da se ne izvija. Osim toga, u aluminijsku ploču te debljine nije problem urezati navoje koji će držati dijelove na mjestu.

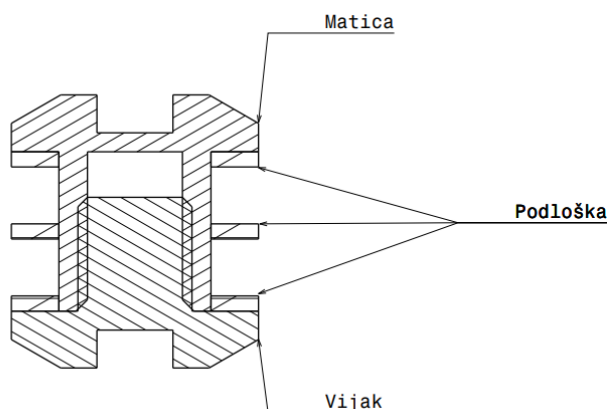
Još jedna od generalnih ideja koje treba iznijeti na početku je ostvarivanje revolucionarnih zglobova između dvije aluminijske ploče. Kako je lim pretanak za umetanje valjnih ležajeva na zglobove, koristit će se klizni. Da se ti zglobovi ne bi morali posebno izraditi radi jednostavnosti i cijene, potrebno je odabrati neko već gotovo rješenje. Pretraživanje tržišta nije dalo dobre rezultate pa je na kraju odlučeno da će se zglobovi ostvariti korištenjem vijčanih spojeva koji služe za namještaj. Takav vijčani spoj se sastoji od vijka i cilindrične matice, a prikazan je na slici 4.





**Slika 4. Vijčani spoj za namještaj**

Na taj spoj se dodaju još plastične podloške na sve dodirne površine koje planarno kližu. Odabrani vijčani spojevi su dimenzija M6 x  $\phi 8$ , s promjerom glave  $\phi 13$  i duljinom od 12 mm koja će se po potrebi skratiti. Prema tim dimenzijama su odabrane i podloške veličina  $\phi 8$  x  $\phi 13$  x 0,8.



**Slika 5. Prikaz spojnice u presjeku**

Duljina cilindričnog dijela matice iznosi 8.4 mm. Kod sklapanja će se taj dio pobrusiti tako da se dobije dovoljna zračnost među dijelovima da se ne pojavljuju velike sile trenja, a da se u isto vrijeme zadržava uvjet paralelnosti spojenih dijelova.

## 2.1. Odabir komponenti

Kod odabira komponenti se prvenstveno gledaju pogonski motori i aktuator na hvataljci.

Motori koji bi se mogli koristiti su kontinuirani DC motor, servo motor i koračni motor. U tablici 1 su prikazane prednosti i nedostaci za svaki od tih motora.

**Tablica 1. Prednosti i nedostaci promatranih motora**

	Prednosti	Nedostaci
Kontinuirani DC motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dostupan veliki izbor motora</li> <li>• Jednostavni za upravljanje</li> <li>• S reduktorom se mogu postići velike sile koristeći motor malih dimenzija</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potreba za reduktorom da se postigne potrebni moment</li> <li>• Loše standardizirane veličine i potrebe montaže</li> </ul>
Servo motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Najjeftiniji izbor zbog ugrađenog reduktora</li> <li>• Visoka preciznost</li> <li>• Dostupni u nekoliko standardnih veličina sa standardnim pozicijama provrta za montažu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potreba za upravljačkom jedinicom</li> <li>• Relativno mali izlazni moment</li> </ul>
Koračni motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nema potrebe za reduktorom kod malih brzina</li> <li>• Relativno niska cijena</li> <li>• Dinamičko kočenje je ostvareno tako da zavojnice motora ostaju magnetizirane, što sprečava rotaciju osovine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Loše performanse pod promjenjivim opterećenjem</li> <li>• Troši puno struje</li> <li>• Potreba za posebnom upravljačkom jedinicom</li> </ul>

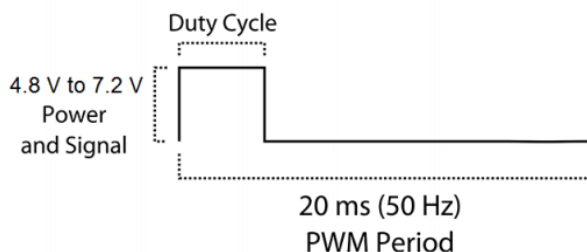
Uzevši u obzir sve navedene prednosti i nedostatke može se zaključiti da su za ovu primjenu najbolji servo motori. Kako je jedan od nedostataka servo motora relativno mali izlazni moment, najbitniji kriterij kod izbora motora je bio upravo taj da moment bude čim veći. Promatrani su tzv. hobby motori koji se odlikuju jednostavnošću upravljanja ali zbog malih dimenzija, pa time i snage normalno da nisu u rangi industrijskih motora. Jedan od takvih motora s najvećim izlaznim momentom je TowerPro MG996R. Karakteristike tog motora koje su dostupne od proizvođača su prikazane u tablici 2. Može se odmah spomenuti da će se u nastavku teksta pod pojmom motor 1 podrazumijevati motor koji robota okreće oko z osi, motor

2 je onaj koji upravlja segmentom 1, a motor 3 upravlja polugom, a samim time i segmentom 2.

**Tablica 2. Karakteristike motora TowerPro MG996R**

Masa	55 g
Gabaritne dimenzije	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Izlazni moment	9.4 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
Radna brzina	0.17 s/60° (4.8 V), 0.14 s/60° (6 V)
Struja pri maksimalnom momentu	2.5 A (6 V)
Širina mrtvog pojasa	5 μs
Radna temperatura	0 °C – 55° C

Taj se motor, kao i svaki drugi hobby servo motor upravlja pulsno-širinskom modulacijom, tj. PWM signalom. Duty Cycle PWM-a je linearno vezan na kut zakreta motora. Tako se za puls od 1.5 ms (7.5% duty cycle) servo motor nalazi u svojoj nultoj poziciji, za puls od 1 ms (5% duty cycle) se nalazi na -90°, a za puls od 2 ms (10% duty cycle) se nalazi na 90°.



**Slika 6. Signal za upravljanje motorom**

Da bi se izbjeglo korištenje PWM pinova na Raspberry Pi-u, a i da se motori električki odvoje, za upravljanje motorima će se koristiti Adafruit 16-channel servo driver. To je modul koji omogućuje upravljanje sa 16 motora istovremeno uz napajanje iz nezavisnog izvora. On dolazi u HAT (Hardware Attached on Top) izvedbi za Raspberry Pi, a informacije prima preko I2C komunikacije.

Preostaje još odabrati aktuator za hvataljku robota. Konstrukcija same hvataljke je obuhvaćena u sljedećem poglavlju, ali potrebno je prvo definirati vrstu pogona i odabrati komponentu koja će se koristiti. Za hvataljku robota je bitno da se može nalaziti u dva stanja, tj. da je normalno otvorena, a kod prihvatanja figure da se zatvori do kraja. Kako nije potrebno upravljati pozicijom aktuatora, dovoljna je samo binarna logika. Generalno se za takvu primjenu koriste

pneumatski cilindri, no to bi značilo da bi se u sklop morao staviti još i kompresor i razvodnik. Svi dijelovi sustava rade na električnu energiju pa je onda najbolje i za hvataljku koristiti električni aktuator. Najjednostavnije i najjeftinije rješenje je korištenje linearnog elektromagneta koji se još često naziva solenoid. To je elektromagnetska naprava koja električnu energiju pretvara u linearno gibanje osovine. Sastoji se od zavojnice koja provodi struju i stvara magnetsko polje, željezne ili čelične čahure da upotpuni magnetski krug i osovine za prijenos linearnog gibanja. Kad kroz zavojnicu teče struja, osovina aktuatora se privlači prema kućištu (pull-in tip), a kad se dotok energije prekine, opruga vraća osovinu u svoj početni položaj. Te komponente imaju dva nedostatka u odnosu na pneumatski cilindar. Prvi je taj da sila privlačenja nije konstantna u cijelom području rada, a drugi je problem zagrijavanja. Naime, kako struja prolazi kroz zavojnicu ona se zagrijava i može postići visoke temperature što ima za posljedicu to da se ošteti izolacija i dolazi do kratkog spoja. Za vrijeme u kojem robot prebaci figuru, zavojnica se još ne stigne zagrijati dovoljno da bi došlo do oštećenja, ali kod dugotrajnog rada je svakako potrebno voditi pozornosti o tome. Linearni elektromagneti s nazivnim naponom od 5 V na koliko radi cijeli ostatak sustava imaju premale sile povlačenja i premali hod, pa je bilo potrebno naći neki koji radi na 12 V. Odabran je linearni elektromagnetski aktuator JF-0730B. Njegove karakteristike su prikazane u tablici 3.

**Tablica 3. Karakteristike linearnog elektromagnetskog aktuatora JF-0730B**

Nazivni napon	12 V
Nazivna struja	300 mA
Sila privlačenja kad je osovina uvučena	5 N
Hod osovine	10 mm
Gabaritne dimenzije	55 x 18 x 15 mm
Masa	40 g

Da bi se odabralo adekvatno napajanje, potrebno je razmotriti potrošnju svakog dijela sustava. Za napajanje Raspberry Pi-a je potrebno napajanje od 5 V koje daje bar 2.5 A. Proizvođač savjetuje da se radi sigurnosti koristi njihovo originalno napajanje od 3 A pa će se zato Raspberry Pi napajati tim neovisnim izvorom. Najveća potrošnja motora kad rade na 6 V je oko 2.5 A. Pošto su potrebna 3 motora, ukupna struja je 7.5 A. Ni u jednom trenutku neće sva tri motora biti maksimalno opterećeni, ali ovakav način odabira napajanja je na strani sigurnosti.

Kroz zavojnicu aktuatora prolazi 300 mA struje na 12 V. Kod odabira napajanja se mogu ponuditi dvije opcije. Jedna opcija je da se odabere napajanje koje radi na 5 V sa step-up DC-DC konverterom na 12 V. Druga opcija je napajanje od 12 V sa step-down DC-DC konverterom na 5 V. S energetskeg stajališta je bolja prva opcija jer je potrebna snaga nakon pretvaranja puno manja nego u drugom slučaju, što znači da bi bilo manje gubitaka. Zbog dostupnosti dijelova, ali i zbog mogućnosti podešavanja izlaznog napona na konverteru je ipak odabrana druga opcija. Podešavanjem izlaznog napona se može ispitati rad motora na cijelom radnom rasponu. Na kraju su odabrani V-TAC 12 V 60 W za napajanje, i podesivi step-down DC-DC konverter nepoznatog proizvođača od 300W.

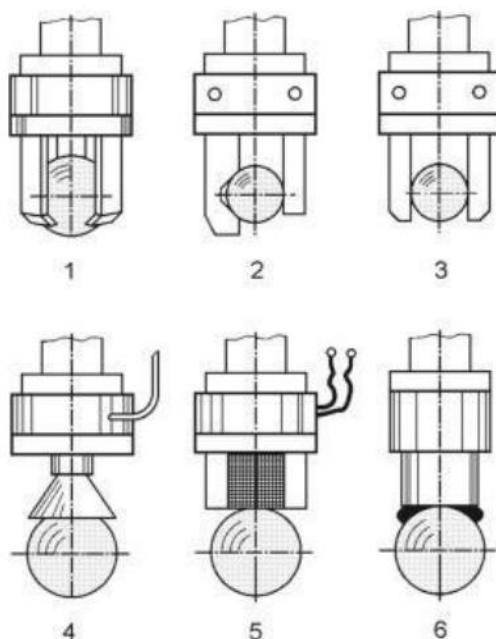
Da se sumira, odabrane su sljedeće komponente:

- Motori: TowerPro MG996R
- Driver: Adafruit 16-channel servo driver
- Aktuator hvataljke: JF-0730B
- Izvor napajanja: Adapter V-TAC 12 V 60 W
- DC-DC konverter: 300 W Step-down

## 2.2. Konstruiranje figura i hvataljke

Konstruiranje robota je počelo od hvataljke zato što puno dimenzija u ostatku robota ovisi o njenoj širini. Prvo je potrebno dati pregled načina na koji hvataljka može primiti objekte.

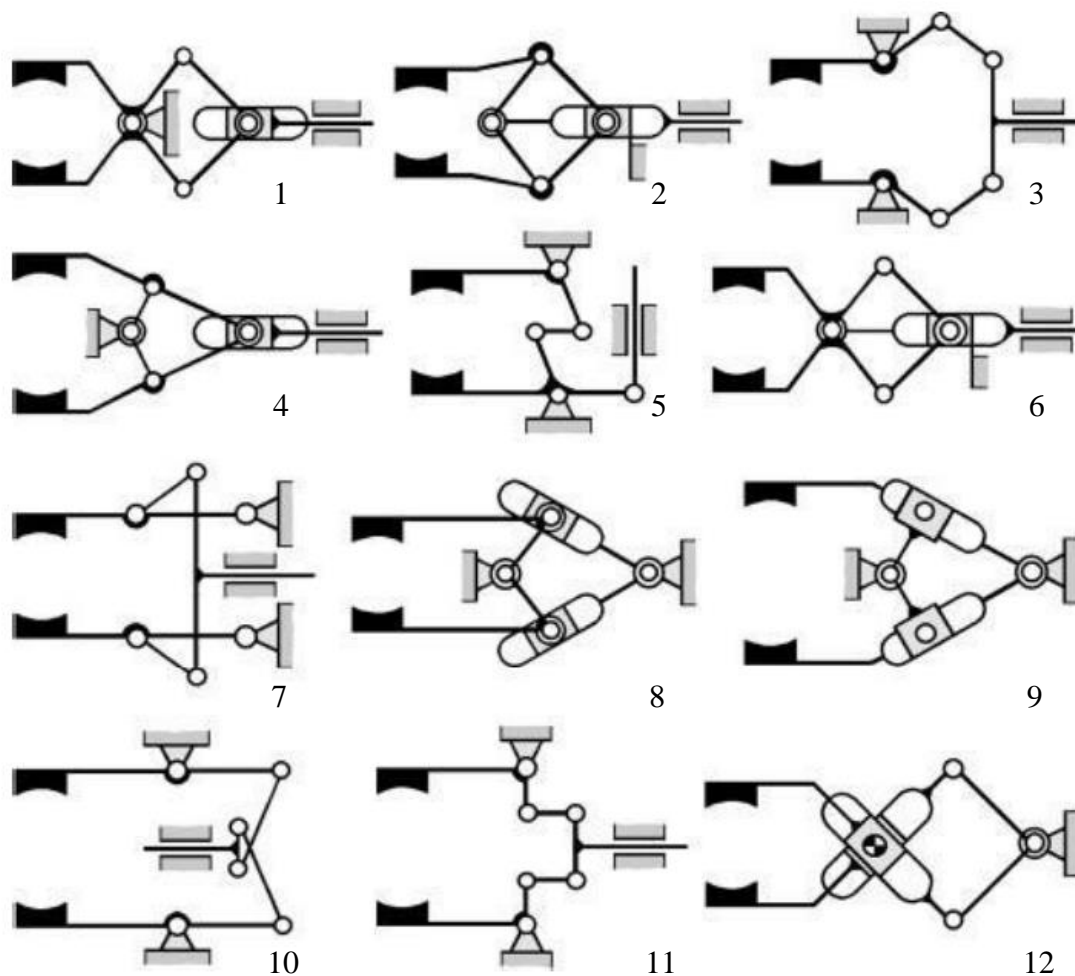
- 1 Obgrljena struktura
- 2 Parcijalno nasjedanje s normalnom silom
- 3 Stezanje normalnom silom
- 4 Vakuumsko prihvaćanje
- 5 Magnetsko prihvaćanje
- 6 Prihvaćanje ljepljivim medijem



**Slika 7.    Mogućnosti prihvaćanja radijalnih i sfernih objekata**

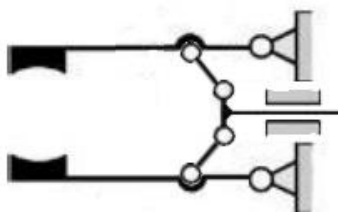
Za stezanje se koristi linearni elektromagnetski aktuator pa nije moguće ostvariti mogućnosti 4, 5 i 6 sa slike 7. Kako je sila privlačenja tog aktuatora relativno mala, najbolje je uzeti obgrljenu strukturu. Za tu je strukturu potrebno da su svi objekti koji se prihvaćaju isti ili slični, što je kod šahovskih figura apsolutno ostvarivo.

Kinematički modeli hvataljki koji su se razmatrali kod izrade hvataljke su prikazani na slici 8. I kod konstrukcije hvataljke se stavlja naglasak na korištenje rotacijskih stupnjeva slobode zbog jednostavnosti.



**Slika 8. Kinematički modeli hvataljki sa 6 rotacijskih zglobova i 1 ili 2 linearna zglobova**

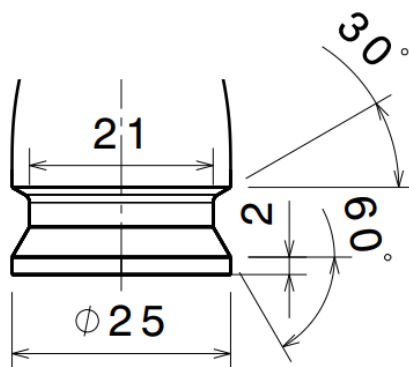
Od prikazanih kinematičkih modela se za primjenu kod ove hvataljke najbolje čine strukture 7 i 10. Struktura 7 je takva da se uvlačenjem osovine hvataljka rasteže, a struktura 10 ima taj nedostatak da je nespretno pozicioniranje nepomičnih oslonaca. Zato je osmišljena nova struktura prikazana na slici 9 koja spaja poziciju oslonaca strukture 7 i stezanje hvataljke uvlačenjem cilindra kao što je to slučaj u strukturi 10.



**Slika 9. Odabrani mehanizam hvataljke**

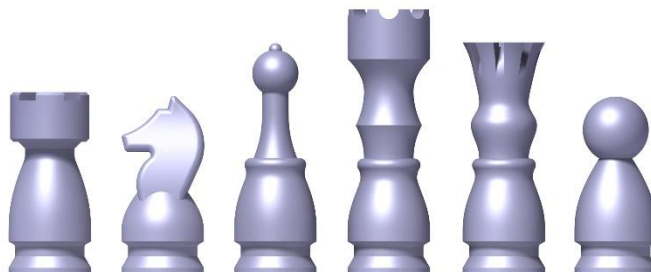
Generalna ideja je da hvataljka primi šahovsku figuru pri njenom dnu, zato što sva dna figura mogu biti jednaka što hvataljku čini jednostavnijom. Prvi zadatak je definiranje figura koje će služiti za igranje šaha. Pretraživanje gotovih figura daje brojne rezultate, ali dna tih figura u

većini slučajeva nisu jednaka, a ona koja su jednaka nisu dobro prilagođena za prihvrat. Zato je odlučeno da će se figure samostalno konstruirati i izraditi. Mjesto prihvata je napravljeno tako da bude malo više od onog što se može vidjeti na ostalim figurama na tržištu što omogućava dobro prihvaćanje figura i ako robot nije precizno pozicioniran.



**Slika 10. Izgled siluete figura**

Također, stavljena su skošenja koja zbog kojih će se figure nasloniti na oblik hvataljke i pri podizanju će ostati poravnate. Ostatak figura je modeliran bez posebnih konstrukcijskih zahtjeva, uzimajući u obzir samo vizualne aspekte. Bitno je napomenuti da je najviša figura „kralj“ s visinom od 80 mm. Ta je dimenzija bitna za konstrukciju hvataljke jer ona definira duljinu poluga. Modeli svih figura su prikazani na slici 11.

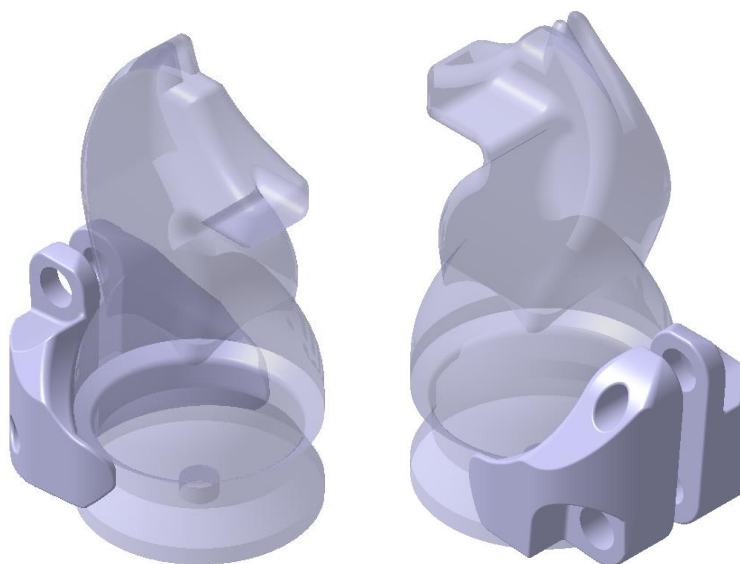


**Slika 11. Bočni prikaz šahovskih figura**

Osim visine, potrebna je bar približna veličina polja koja će se koristiti da se može ograničiti otvaranje hvataljke. Odabrana je veličina polja od 50 x 50 mm. Ta dimenzija je dovoljno velika da se ostavi mjesta za hvataljku, a dovoljno mala da segmenti robota ne budu preveliki što ima za posljedicu povećanje mase. Ako se pretpostavi da su sve figure pozicionirane točno u sredini, onda je najmanja udaljenost između dvije figure udaljene 2 polja jednaka 75 mm. Potrebno je uzeti još neki faktor sigurnosti zbog nepravilnog pozicioniranja pa se najveća udaljenost na točkama hvataljke ograničava na 65 mm.

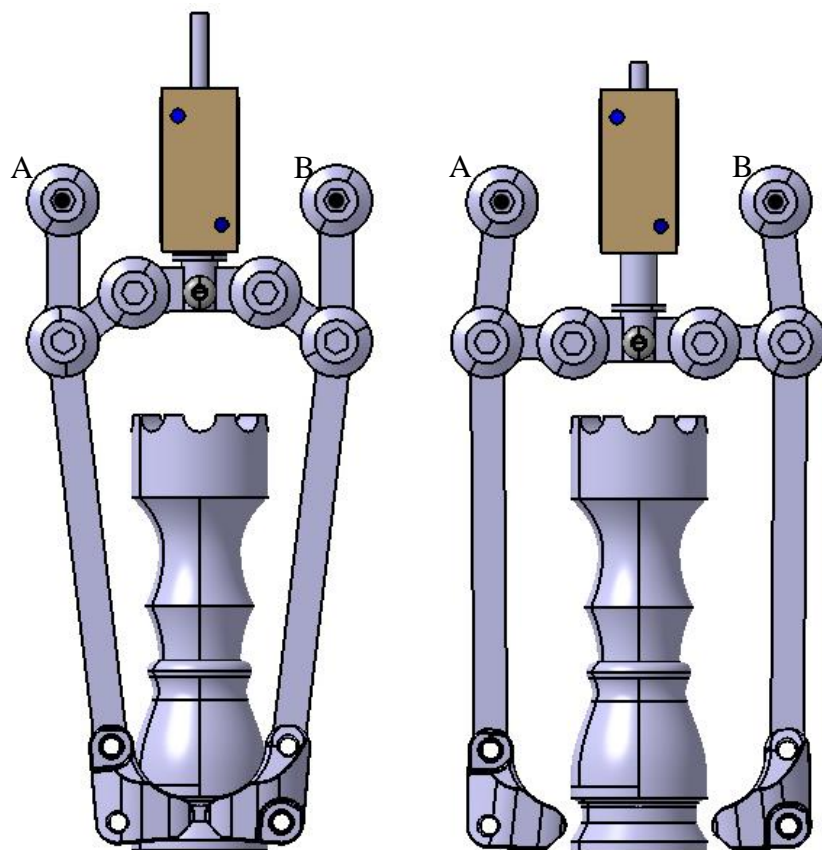


Nakon što su definirani mehanizam i figure, može započeti konstruiranje dijelova hvataljke. Taj proces počinje konstrukcijom držača koji je izrađen prema ofsetu siluete figura za 0.1 mm. Spajanje s polugama se ostvaruje pomoću dva M4 vijka. Dimenzije su prilagođene tako da držač zauzima minimalno mjesta u polju. Zbog kompleksne geometrije će se taj dio izraditi 3D printanjem.



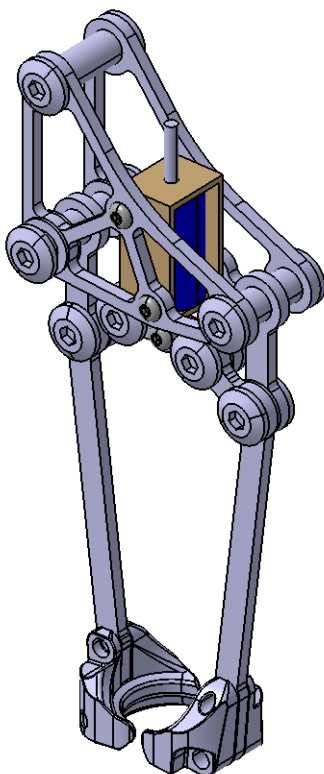
**Slika 12. Model držača figura**

Prije početka konstruiranja ostatka dijelova potrebno je odrediti dimenzije. Dimenzije su određene tako da su unutar Sketch-a postavljena geometrijska ograničenja definirana mehanizmom na slici 9. Potom su se neodređene dimenzije iteracijski mijenjale da se zadovolje tri uvjeta. Prvi uvjet je taj da su poluge hvataljke vertikalne kad je ona otvorena. Time se dobije najmanji pomak poluga u odnosu na pomak osovine pri početku gibanja. Samim time, smanjena je potrebna sila privlačenja. Drugi uvjet je da je linija koja predstavlja dimenziju poluge otprilike prolazi kroz predviđene rupe na držaču kad je hvataljka zatvorena. Time poluga može ostati tanka da se ne sudara u ostale figure. Treći uvjet je da se iskoristi puni hod osovine od 10 mm da nije potrebno stavljati dodatna ograničenja.



**Slika 13. Izgled zatvorene (lijevo) i otvorene (desno) hvataljke**

Potrebno je još napraviti nosač hvataljke koji omogućuje rotaciju poluga oko točaka A i B, na koji se može pričvrstiti aktuator i koji ima predviđeno mjesto prihvata za poveznicu mehanizma dvostrukog paralelograma. Osim toga, potrebno je da nosač ima čim manju masu što znači da mora biti rešetkaste strukture. Može se vidjeti da su u modelu hvataljke iskorištene prije definirane spojnice. Sličan princip je preuzet i za stvaranje revolutnih zglobova više dijelova. Cilindrične šipke s unutarnjim navojem koje drže razmak između dijelova i ujedno služe kao zglobovi za prijenos gibanja imaju sve dimenziju  $\phi 8 \times M6 \times L$ , gdje L označava duljinu. Kako će se svi dijelovi napravljeni od aluminijskog lima od 3 mm dati rezati laserom, nije ih potrebno dimenzijski opisivati i raditi tehničku dokumentaciju. Ipak, mogu se dati gabaritne dimenzije cijele hvataljke koje iznose 37.1 x 63 x 165 mm. Gotov model hvataljke je prikazan na slici 14.



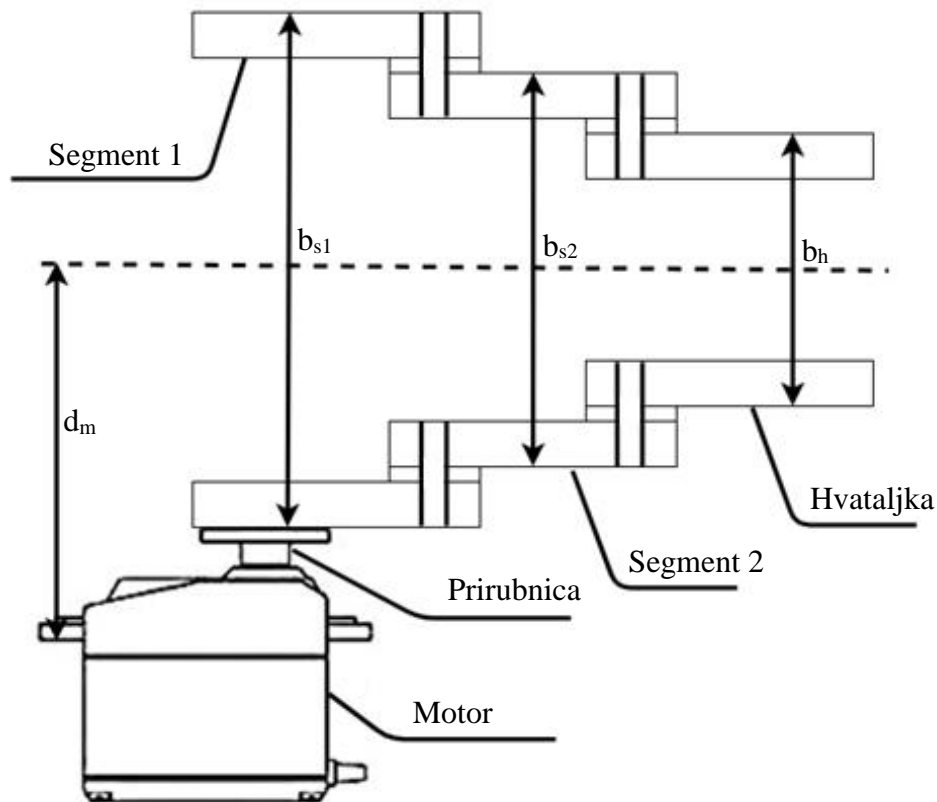
**Slika 14. Model sklopa hvataljke**

U ovom dijelu je još jasnije zašto je modeliranje krenulo od hvataljke. Širina hvataljke definira širinu drugog segmenta, on definira širinu prvog segmenta koji na kraju definira glavni nosač, mjesta prihvata motora itd. Iako dimenzije širine nosača nisu odmah eksplicitno jasne, one se mogu jednostavno izračunati jer je već poznato kako će segmenti biti napravljeni i spojeni.

### **2.3. Konstruiranje glavnog nosača**

Ideja je da se segmenti spajaju na način opisan u prošlom poglavlju, koristeći cilindrične spojnice. Osim toga, na svakom spoju je između dijelova koji se gibaju stavljena plastična podloška na sličan način kao i kod spojnice. Bitno je da se glavni nosač konstruira prije samih segmenata i poluga zato jer je za određivanje njihovih duljina potrebna visina na kojoj se nalaze osi motora koji upravljaju gibanjem. Proces konstruiranja počinje definiranjem zahtjeva koje model mora zadovoljiti. Prvi zahtjev je da se nosači motora mogu jednostavno montirati na ostatak konstrukcije, bez potrebe za posebnim dijelovima. To se ostvaruje na način da se točno definira širina prvog segmenta, način spajanja segmenta s motorima te da se iz modela motora dobiju udaljenosti od odabrane priрубnice motora do ravnine naslona za montažu. Drugi zahtjev je da se odredi visina osi vrtnje motora koja je dovoljna da spriječi sudaranje poluge s ostatkom konstrukcije. Treći zahtjev je da se unaprijed odredi prihvat za poveznicu koja je dio MDP.

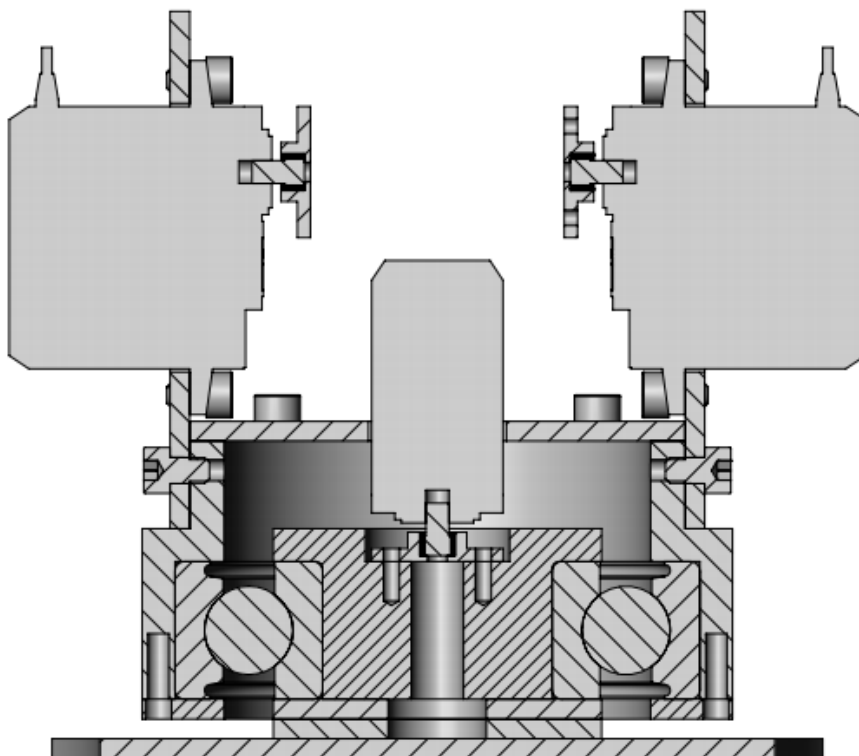
Također treba uzeti u obzir to da je poželjno da se većina dijelova izrađuje rezanjem laserom. Da bi se ostvario prvi zahtjev, potrebno je odrediti širine segmenata. Ta je analiza grafički prikazana na slici 15.



**Slika 15. Prikaz širina dijelova robota**

Iz modela je poznato da je širina hvataljke  $b_h = 23.5$  mm. Širina segmenta 2  $b_{s2}$  je od širine hvataljke veća za dvije širine podloški i dvije širine aluminijske ploče, što znači  $b_{s2} = 23.5 + 2 \cdot 0.8 + 2 \cdot 3 = 31.1$  mm. Po istoj logici se dobije širina segmenta 1  $b_{s1}$  koja iznosi 38.7 mm. Da bi se dobila udaljenost ravnine za montažu motora od osi simetrije  $d_m$ , potrebno je prvo odabrati adekvatnu prirubnicu. Kod kupnje motora se u paketu dobiju četiri vrste prirubnica od kojih su sve plastične i nemaju dobro predviđene provrte za montažu. Zato su se odvojeno odabrale aluminijske prirubnice koje odgovaraju odabranom motoru (25 zuba na vratilu), a montiraju se s četiri M3 vijka. Prema dostupnim modelima motora i odabrane prirubnice izmjereno je da udaljenost od ravnine za montažu motora do ravnine za montažu prirubnice iznosi 18.4 mm. To znači da je udaljenost  $d_m$  jednaka  $b_{s1}/2 + 18.4 = 37.75$  mm.

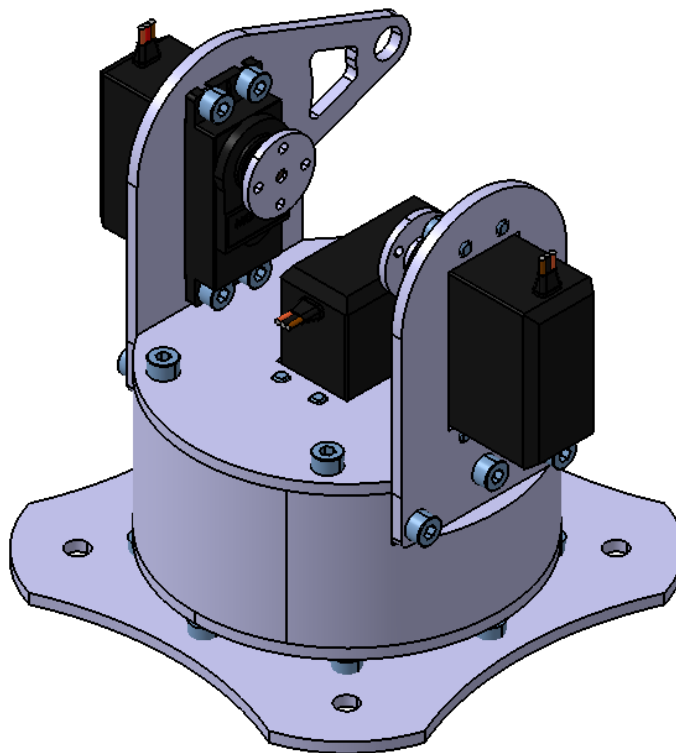
Nakon što su definirane ravnine prihvata motora, može se prikazati osmišljeni način prijenosa kružnog gibanja motora 1.



**Slika 16. Prikaz načina prijenosa rotacije glavnog nosača**

Kao što se tražilo, većina dijelova je predviđena da se izradi laserskim rezanjem. Ipak, za izradu vanjskog i unutarnjeg dijela nosača je neizbježna upotreba tehnologija tokarenja i glodanja. Tehnički nacrti tih dijelova su dani u prilogu.

Korišteni ležaj je SKF 6307. On ima dovoljno velik unutarnji promjer da se njegov unutarnji prsten može pričvrstiti za unutarnji dio nosača, a vanjski promjer je u skladu s načinom na koji je osmišljeno prihvaćanje nosača motora za vanjski dio nosača. Model gotovog glavnog nosača je prikazan na slici 17. Kao što se na slici može vidjeti, prihvat za poveznicu MDP-a je napravljen u produžetku jednog od nosača motora. Na taj dio će se naknadno pričvrstiti osovina oko koje će poveznica rotirati. Što se tiče visine na kojoj se nalaze motori, ona u velikom udjelu utječe na raspon kuta poluge kad je os vrtnje blizu nosača motora 1. Povećanjem visine se taj utjecaj sve više smanjuje. Pošto za primjenu robota za igranje šaha ionako nije potrebno da se hvataljka diže visoko po z osi, motori su pozicionirani uspravno, s time da dna motora 2 i 3 stoje uz sam rub nosača motora 3. Takvim pozicioniranjem se poluga može pomaknuti otprilike  $55^\circ$ , što je dovoljno za gotovo sve primjene.



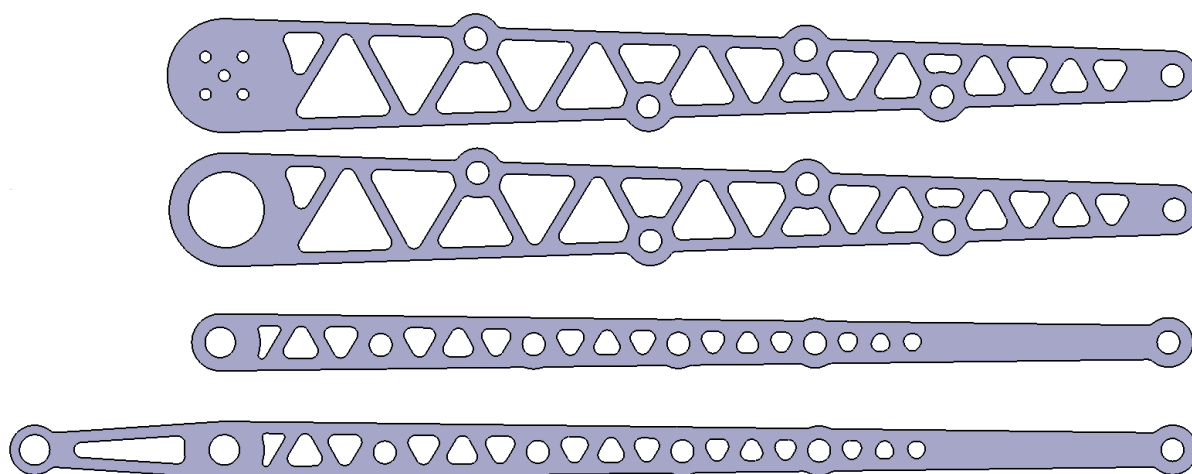
**Slika 17. Model gotovog glavnog nosača**

#### **2.4. Konstruiranje segmenata i poluga**

Glavna dimenzija koja definira segmente i poluge je njihova duljina, tj. udaljenost između dvije osi rotacijskih zglobova koje one povezuju. Da bi se odredile te dimenzije, potrebno je prvo poznavati visinu osi motora. Pronalaženje potrebnih dimenzija segmenata se provelo tako da se napravio model sklopa s glavnim nosačem, šahovskim poljem i hvataljkom. Hvataljka se pozicionirala na najudaljenije polje od nosača, te ne onda napravljen novi sketch koji prolazi kroz oba podsklopa. U sketchu su napravljene dvije linije jednakih duljina koje predstavljaju duljine segmenata 1 i 2. Pomicanjem tih linija se ustvrdilo da je najbolji izbor za duljinu segmenata 250 mm.

Nakon što su poznate dimenzije, konstruiranje segmenata može započeti. Segmenti su dijelovi koji najviše opterećuju motore, pa je potrebno da se olakšaju na način da se konstruiraju kao rešetkasti nosači. Širina svake te rešetke se stavlja na 3 mm, tako da će profil biti kvadratni. Za prvi nosač, odabire se takav promjer na jednom kraju nosača (prihvat motora) da bude nešto veći od promjera prirubnice, s ciljem da glave vijaka ostaju unutar konture. Drugu dimenziju definira zglob između segmenta 1 i 2. Pošto je taj zglob ostvaren istim vijkom koji se koristi kod spojnica, za drugi promjer segmenta 1 se uzima promjer glave tog vijka.

Dimenzije segmenta 2 se također odabiru prema promjeru vijka spojnice, s time da promjeri na segmentu 2 nisu linearno povezani da bi se smanjila masa i dobio bolji vizualni efekt. Lijevi i desni dijelovi segmenata će se dodatno međusobno spojiti da bi se dobila bolja krutost. Bočni prikazi lijevih i desnih dijelova segmenata 1 i 2 su prikazani na slici 18. Može se vidjeti da ti segmenti nisu simetrični. Razlog tome je taj što se segment 1 s jedne strane pričvršćuje za motor, dok se s druge strane mora ostaviti otvor kroz koji prolazi poluga. Segment 2 je s jedne strane ograničen zglobovima, dok je s druge strane napravljen još i produžetak na koji služi za prijenos gibanja od motora 2 preko poluge i poveznice.



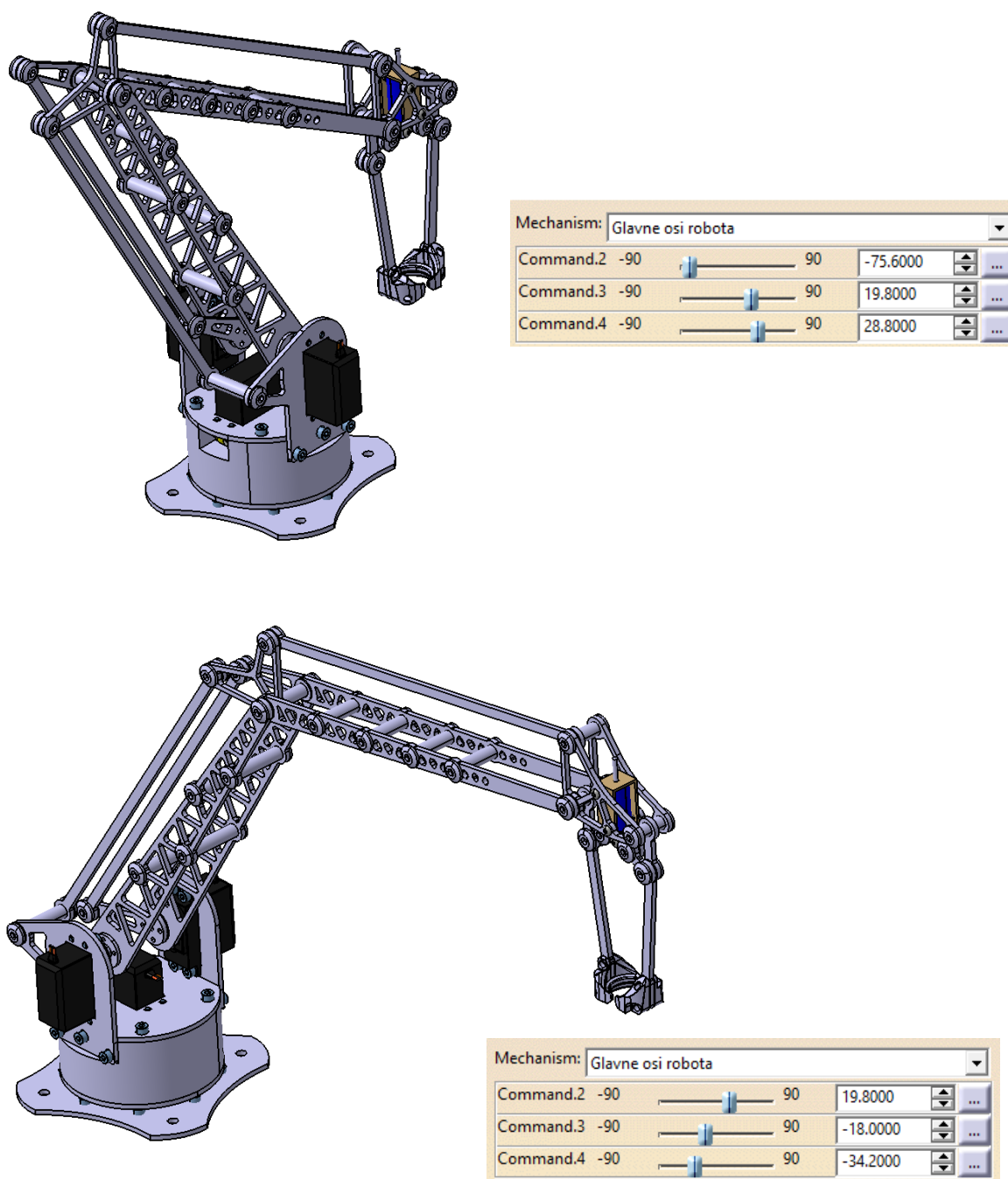
**Slika 18. Bočni prikaz dijelova segmenata**

Za polugu koja prenosi rotacijsko gibanje s motora na segment 2 je poznato da mora njena dimenzija biti jednaka duljini nastavka dužeg dijela segmenta 2. Isto tako, poveznica koja spaja ta dva dijela mora biti jednaka duljini segmenta 1. Na taj se način dobije paralelogram što znači da je promjena kuta između dvije stranice na jednom kraju jednaka promjeni kuta na drugom kraju.

Taj se princip iskorištava i za dimenzioniranje mehanizma dvostrukog paralelograma. U tom mehanizmu se nalazi trokut koji je jednim krajem poveznicom povezan za glavni nosač, drugom poveznicom je vezan na hvataljku, a trećim krajem je vezan za zglob segmenta 1 i 2. Zbog tog je mehanizma posrtanje trokuta jednako na cijelom području rada, pa je zato i hvataljka stalno vertikalna.

Nakon što su konstruirani svi dijelovi, izrađen je sklop cijelog robota. Koristeći DMU Kinematics unutar programskog paketa Catia u kojem je sve konstruirano, dodane su kinematičke veze na zglobove robota. Korišteni su samo Revolute, Cylindrical i Rigid zglobovi,

s time da su tri revolutna zgloba definirani kao upravljivi. Osim toga, dodane su i kinematičke veze za hvataljku kojoj se upravlja translacijskim zglobom – pomakom osobine linearnog elektromagnetskog aktuatora. Dodavanjem tih kinematičkih veza se može dobiti dobar uvid u eventualne nedostatke i ograničenja konstrukcije, lako je vidljivo ako će pri pomicanju motora doći do sudara dijelova i može se bolje ustvrditi radno područje. Na slici 19 je prikazan cijeli sklop robota u dvije različite pozicije.

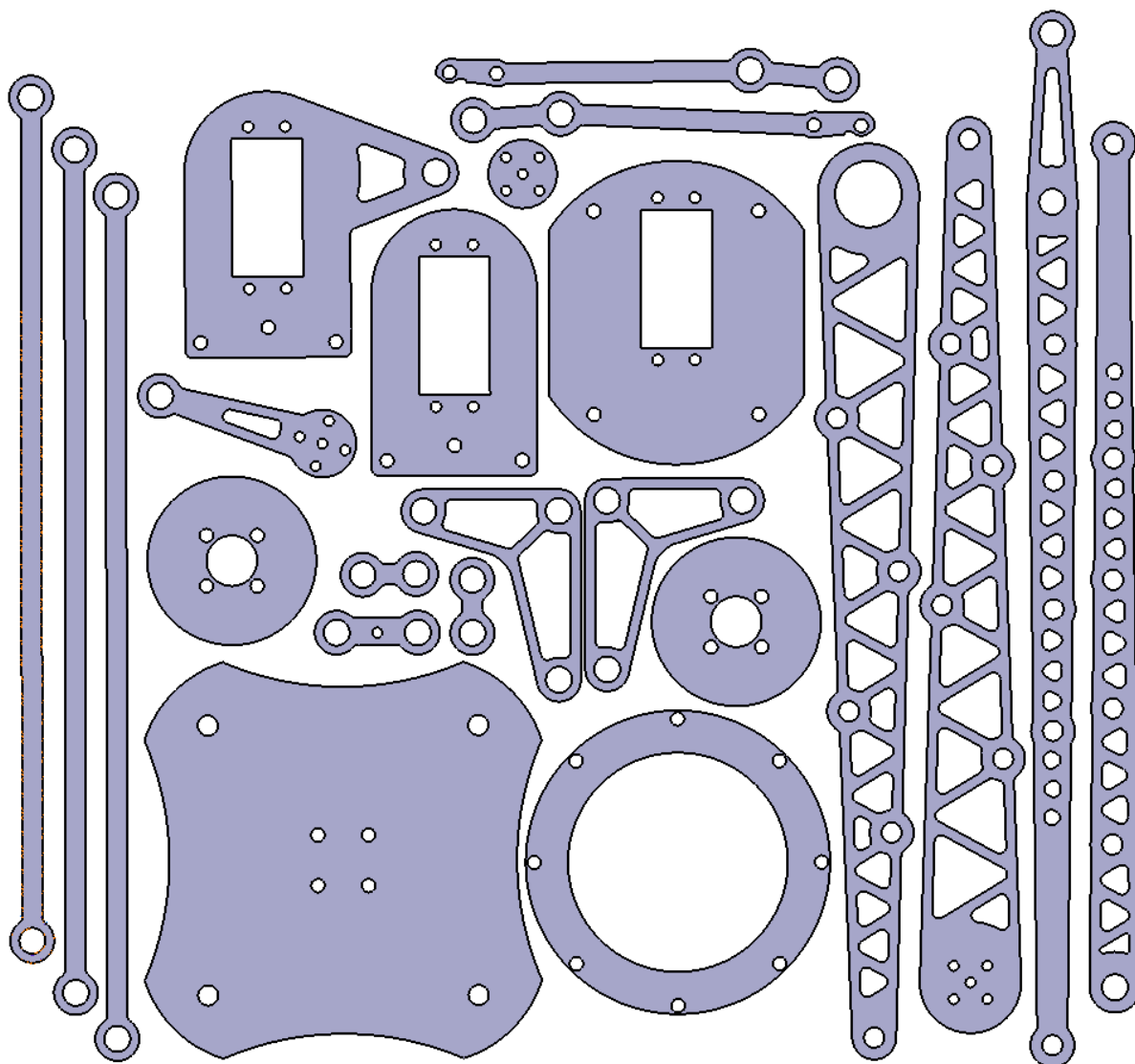


**Slika 19. Prikaz gotovog modela robota u različitim položajima**



### 3. IZRADA I SKLAPANJE DIJELOVA ROBOTA

Nakon što su gotovi svi modeli, potrebno ih je proizvesti. Dijelovi koji su predviđeni za rezanje laserom su svi stavljeni u novi sklop i raspoređeni na način da zauzimaju minimalno mjesta. Na slici 20 se može vidjeti taj raspored dijelova koji zauzima samo 330 x 340 mm aluminijske ploče.

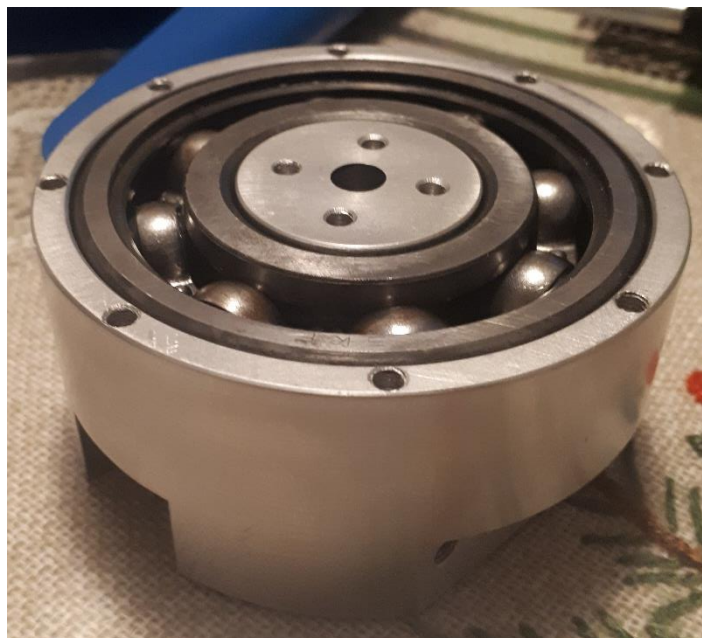


**Slika 20. Raspored dijelova na pripremi za lasersko rezanje**

Svi provrti na dijelovima koji su služili kao zglobovi su napravljeni manji za 0.3 mm zato jer mora dodirna površina na tom dijelu biti kvalitetno obrađena, a rezanje laserom ostavlja prilično grube rubove. Osim samih nepravilnosti na rubovima, veliki nedostatak laserskog rezanja aluminijskih dijelova je srh koji nastaje topljenjem metala. Nakon što su dobiveni gotovi dijelovi, provrti za rotacijske zglobove su se povećali razvrtačem, rubovi su se obrađivali

raznim pilama, a površina je brušena brusnim papirom različitih vrijednosti od najgrubljeg do najfinijeg.

Dijelovi glavnog nosača čiji se tehnički nacrti mogu vidjeti u prilogu su izrađeni tehnologijama tokarenja i glodanja. Na slici 21 su je prikazan sklop tih dijelova zajedno s ležajem



**Slika 21. Sklop dijelova izrađenih tokarenjem i glodanjem**

Od ostalih dijelova koji su se morali obrađivati treba još spomenuti tokarenje cilindričnih šipki s unutarnjim navojem koje drže razmak između dijelova i ujedno služe kao zglobovi za prijenos gibanja. One su sve dimenzija  $\phi 8 \times M6 \times L$ , gdje L označava duljinu. U tablici 4 je prikazano koje su potrebne duljine te broj potrebnih komada za svaku od njih.

**Tablica 4. Dimenzije i količina cilindričnih šipki s navojem**

Dimenzija L za $\phi 8 \times M6 \times L$	Potreban broj komada
L = 17.5 mm	2
L = 25.1 mm	5
L = 32.7 mm	5
L = 37.4 mm	1

Kao što je rečeno, zbog kompleksne geometrije su se držala figura izradila aditivnom tehnologijom FDM printanja. Rezultat je prilično gruba površina, ali jedino je bitno da se figure

mogu podizati oblikom što je svakako dovoljno dobro. Zarezi za prihvrat poluga hvataljke su printanjem ispali točno takvih dimenzija da je ostvaren čvrst dosjed.



**Slika 22. Printana držala za figure**

Figure za šah su se izradile na način da su se rezanjem laserom dali izraditi limovi sa siluetom figura koji su se pričvrstili na tokarski stroj. Po tom obliku se potom klizilo alatom što je preslikavalo spomenutu siluetu na obradak. Taj je postupak prikazan na slici 23.



**Slika 23. Izrada figura preslikavanjem siluete**

Šahovska figura posebnog oblika je skakač. Oblik je poseban po tome što nije osnosimetričan pa se ne može izraditi na isti način kao ostatak figura. Glave skakača su se izradile na 4-osnoj CNC glodalici.

Osim preslikavanja oblika figura, potrebno je još ručno obraditi neke dijelove figura kao što su krune. Na figurama će biti potrebno napraviti još jedan postupak obrade, ali to je detaljnije opisano u poglavlju 5.

Nakon skupljanja svih potrebnih dijelova, preostaje još urezati navoje i sklopiti robota. Pri sklapanju se trebalo voditi računa o tome da je svaki zglobov dobro podešen. To znači da je morao biti dovoljno labav da se ne mora savladavati nepotrebna sila trenja, a opet dovoljno čvrst da se zbog prevelikih zračnosti ne bi komprimirala preciznost. To je zahtijevalo dodatno brušenje i prilagođavanje svakog zgloba u robotu.

Nakon sklapanja se ustanovio jedan problem s hvataljkom. Već je rečeno da je negativna strana korištenja linearnog elektromagnetskog aktuatora u usporedbi s pneumatskim cilindrom ta što sila duž gibanja nije konstantna. Od proizvođača je dan samo podatak da je sila privlačenja jednaka 5 N bez grafa koji opisuje ovisnost sile o putu. Najmanja sila tog aktuatora je kad je on najviše ispružen. Jedno prilično jednostavno rješenje tog problema je bilo da se s gornje strane osovine hod ograniči dodavanjem podloški. Ta promjena nije bitno narušila otvorenost hvataljke zato jer je mehanizam takav da uvlačenje osovine najmanje utječe na poluge kad je potpuno izvučena. Na slici 24. je prikazana sklopljena robotska ruka s figurama koje će se koristiti u igri.



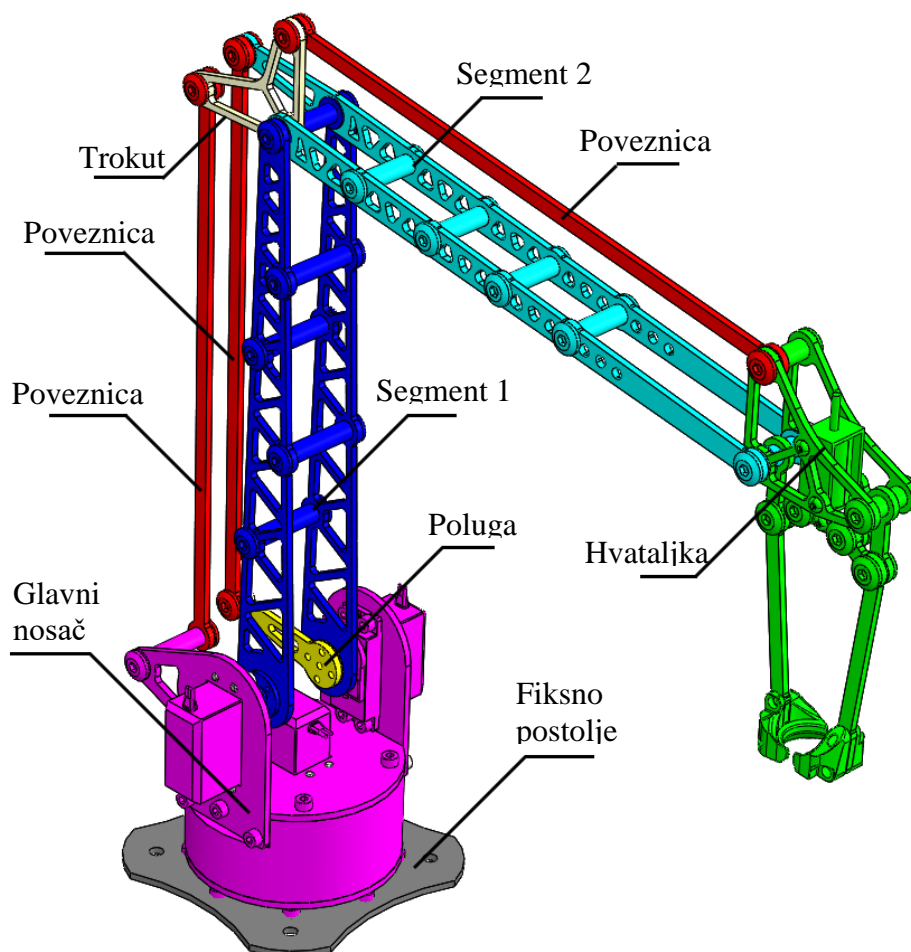
Slika 24. Izgled gotove robotske ruke i figura



## 4. PRORAČUN KINEMATIKE

Da bi robot obavljao svoj zadatak potrebno je ispravno pozicioniranje u prostoru. To znači da u svakom trenutku treba znati svoju poziciju, često i brzinu. Ako su ulazni podaci u sustav trenutni zakreti motora, a izlaz je pozicija hvataljke (ili po želji neke druge točke robota) u prostoru, govori se o direktnoj kinematici. Ako je ulaz u sustav željena pozicija hvataljke, a traženi podatak je kut zakreta motora koji je potrebno poznavati da bi se moglo pozicionirati u prostoru, govori se o inverznom kinematičkom problemu.

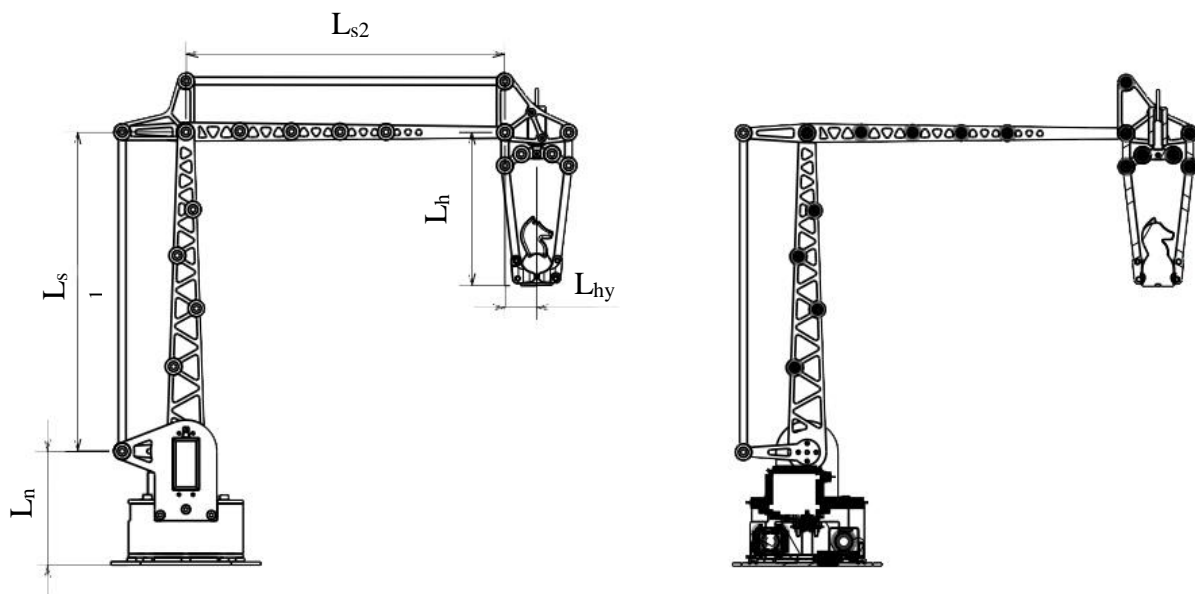
Da bi se proučile kinematičke relacije potrebno je neke dijelove sklopa solidificirati jer se one gibaju zajedno pa se mogu promatrati kao jedno tijelo. Na sljedećoj slici su jednakim bojama prikazani dijelovi koji će se promatrati kao cjelina.



Slika 25. Prikaz solidificiranih dijelova sustava

#### 4.1. Proračun direktne kinematike

Dimenzije relevantne za kinematički proračun su prikazane na slici 26. Lijeva slika prikazuje bočni prikaz robota na kojem se vidi MDP, a na desnoj slici se vidi polužni mehanizam koji upravlja orijentacijom segmenta 2.



**Slika 26. Bočni prikaz s glavnim dimenzijama**

Proračun će se provesti korištenjem homogenih transformacija. Homogene transformacije definiraju položaj i orijentaciju jednog koordinatnog sustava u odnosu prema drugome. Matrice homogenih transformacija su kvadratne, dimenzije 4x4, i nazivaju se homogenima zbog karakterističnih svojstava. Matrica homogenih transformacija ima ovakav izgled:

$$A = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x & p_x \\ i_y & j_y & k_y & p_y \\ i_z & j_z & k_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.)$$

Prva tri stupca određuju orijentaciju, a četvrti daje položaj između koordinatnih sustava. Ako je u koordinatnom sustavu  $O_1$  zadan vektor  $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1, 1)$ , a koordinatni sustav je prema koordinatnom sustavu  $O_0$  definiran matricom  $A_1$ , tada vektor  $\mathbf{p}_1$  u početnom koordinatnom sustavu izgleda ovako:

$$\mathbf{p}_0 = A_1 \mathbf{p}_1 \quad (4.2.)$$

S obzirom da su za definiranje kinematike robota potrebne translacijske i rotacijske transformacije, potrebno ih je definirati. Translacija se u odgovarajućem stupnju slobode

gibanja odvija duž jedne od osi pridruženog koordinatnog sustava. Zbog toga su osi novog koordinatnog sustava nakon translacije paralelne s osima nepokretnog sustava, a ishodište mu je pomaknuto za iznose translacija  $a$ ,  $b$  i  $c$ .

$$Tran(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3.)$$

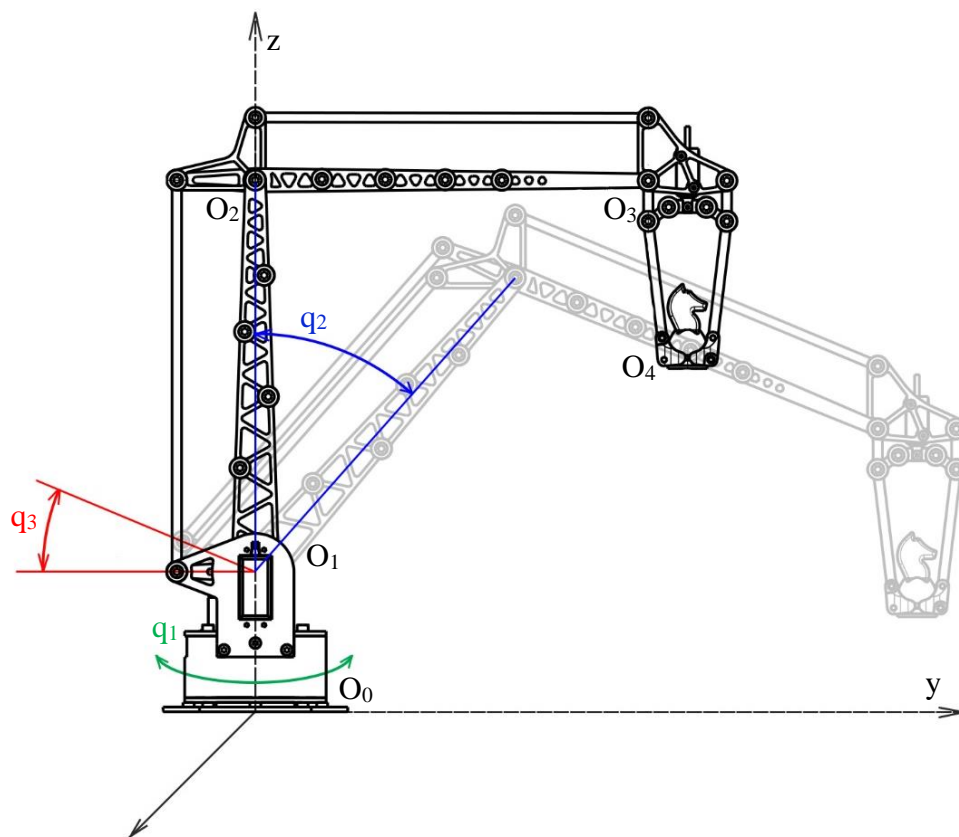
Transformacija rotacije ovisi o tome oko koje osi se zakreće koordinatni sustav. Kod ove primjene su potrebne transformacije rotacije samo oko osi  $x$  i  $z$

$$Rot(x, \vartheta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & 0 \\ 0 & \sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4.)$$

$$Rot(z, \vartheta) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & 0 & 0 \\ \sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5.)$$

Na sljedećoj slici je prikazan robot u svom nultom položaju u usporedbi sa pomaknutim segmentima. Označeni su aktivni pomaci ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ) i ishodišta koordinatnih sustava ( $O_0$ ,  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O_4$ ).





Slika 27. Prikaz upravljivih stupnjeva slobode

Matrica homogenih transformacija iz nepokretnog koordinatnog sustava ( $O_0$ ) u prvi ( $O_1$ ) zapisuje se kao rotacija oko  $z$  osi za iznos  $q_1$  i translacije po  $z$  osi za vrijednost  $L_n$ .

$$A_1 = Rot(z, q_1) \cdot Tran(0, 0, L_n)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6.)$$

Iz prvoga ( $O_1$ ) u drugi koordinatni sustav ( $O_2$ ) dolazi se rotacijom oko osi  $x$  za iznos  $q_2$  i onda translacijom po  $z$  za vrijednost  $L_{s1}$ .

$$A_2 = Rot(x, q_2) \cdot Tran(0, 0, L_{s1})$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_2) & -\sin(q_2) & -L_{s1} \sin(q_2) \\ 0 & \sin(q_2) & \cos(q_2) & L_{s1} \cos(q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7.)$$

Zbog toga što je orijentacija segmenta 2 neovisna o rotaciji  $q_2$ , za transformaciju iz drugog koordinatnog sustava u treći je potrebno prvo napraviti rotaciju oko osi  $x$  za vrijednost  $q_3 - q_2$ , a potom translaciju po osi  $y$  za vrijednost  $L_{s2}$ .

$$A_3 = Rot(x, q_3 - q_2) \cdot Tran(0, L_{s2}, 0)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_2 - q_3) & \sin(q_2 - q_3) & L_{s2} \cos(q_2 - q_3) \\ 0 & -\sin(q_2 - q_3) & \cos(q_2 - q_3) & -L_{s2} \sin(q_2 - q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8.)$$

Konačno, potrebno je još napraviti transformaciju iz trećeg u četvrti koordinatni sustav. Kako je zbog MDP hvataljka uvijek vertikalna, tj. u smjeru koordinatnog sustava  $O_1$ , potrebno je prvo napraviti transformaciju rotacije oko osi x za vrijednost  $-q_3$ , a potom translaciju  $(0, L_{hy}, -L_{hz})$

$$A_4 = Rot(x, -q_3) \cdot Tran(0, L_{hy}, -L_{hz}) =$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_3) & \sin(q_3) & L_{hy} \cos(q_3) - L_{hz} \sin(q_3) \\ 0 & -\sin(q_3) & \cos(q_3) & -L_{hz} \cos(q_3) - L_{hy} \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9.)$$

Budući da se traže položaj i orijentacija robota potrebno je pronaći vezu između koordinatnih sustava  $O_0$  i  $O_4$ . Ta je veza matematički izražena prema jednadžbi:

$${}^mT_n = \prod_{i=m+1}^n A_i \quad (4.10.)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (4.5) do (4.8) u (4.9) dobije se konačni izraz za matricu transformacije referentne točke prihvatnice u odnosu na nepokretni koordinatni sustav robota.

$${}^0T_4 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 =$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & -\sin(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & \cos(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ 0 & 0 & 1 & L_n - L_{hz} + L_{s1} \cos(q_2) + L_{s2} \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11.)$$

Uvrštavanjem poznatih veličina dobije se matrica

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & -\sin(q_1)(250(\cos(q_3) - \sin(q_2)) + 25) \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & \cos(q_1)(250(\cos(q_3) - \sin(q_2)) + 25) \\ 0 & 0 & 1 & 250(\cos(q_2) + \sin(q_3)) - \frac{153}{5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12.)$$

Može se primijetiti da je u prva tri stupca jednadžbe koji označavaju orijentaciju ostala samo prva rotacija oko osi z. Razlog tome je upravo MDP.

Pod pojmom vanjskih koordinata podrazumijeva se položaj robota ( $p_x, p_y, p_z$ ) i njegova orijentacija u prostoru određena Eulerovim kutovima ( $\vartheta, \phi, \psi$ ). Tim se veličinama definira novi vektor

$$\mathbf{r} = [p_x \ p_y \ p_z \ \vartheta \ \varphi \ \psi]^T \quad (4.13.)$$

Očito je da se u ovom slučaju neće pojaviti posrtanje ( $\phi$ ) ni valjanje ( $\psi$ ), a skretanje ( $\vartheta$ ) je direktno definirano preko zakreta  $q_1$ , pa je vektor vanjskih koordinata definiran samo s položajem, bez orijentacija.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ \cos(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) \\ L_n - L_{hz} + L_{s1} \cos(q_2) + L_{s2} \sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (4.14.)$$

Uvrštavanjem poznatih veličina dobije se izraz

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -\sin(q_1)(250(\cos(q_3) - \sin(q_2)) + 25) \\ \cos(q_1)(250(\cos(q_3) - \sin(q_2)) + 25) \\ 250(\cos(q_2) + \sin(q_3)) - \frac{153}{5} \end{bmatrix} \quad (4.15.)$$

Ovim izrazom je u potpunosti određena direktna kinematika sustava. Međutim, često u praksi nije dovoljno poznavati samo položaj robota, već i njegovu brzinu u prostoru vanjskih koordinata. Želimo li pokazati utjecaj diferencijalne promjene unutrašnjih koordinata  $d\mathbf{q}$  na diferencijalnu promjenu vanjskih koordinata  $d\mathbf{r}$ , odnosno saznati brzinu promatrane točke hvataljke promjenom neke unutarnje koordinate, potrebno je pronaći totalni diferencijal funkcije. Taj se totalni diferencijal označava sa  $\mathbf{J}$  i naziva Jacobijeva matrica. A računa se preko izraza

$$J_{ij} = \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (4.16.)$$

Diferenciranjem vektora vanjskih koordinata dobije se Jacobijeva matrica

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -\cos(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) & L_{s1} \cos(q_2) \sin(q_1) & L_{s2} \sin(q_1) \sin(q_3) \\ -\sin(q_1)(L_{hy} + L_{s2} \cos(q_3) - L_{s1} \sin(q_2)) & -L_{s1} \cos(q_1) \cos(q_2) & -L_{s2} \cos(q_1) \sin(q_3) \\ 0 & -L_{s1} \sin(q_2) & L_{s2} \cos(q_3) \end{bmatrix} \quad (4.17.)$$

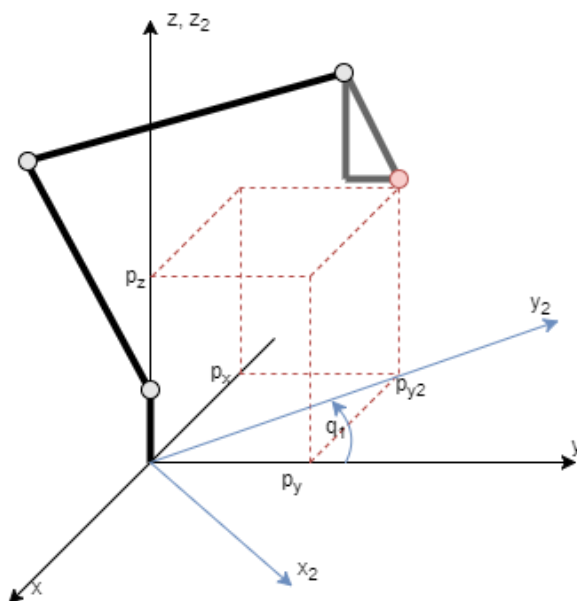
Pojednostavljenjem prije poznatih izrazima i uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobiva se matrica

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -p_y & 250 \cdot \cos(q_2) \sin(q_1) & 250 \cdot \sin(q_1) \sin(q_3) \\ p_x & -250 \cdot \cos(q_1) \cos(q_2) & -250 \cdot \cos(q_1) \sin(q_3) \\ 0 & -250 \cdot \sin(q_2) & 250 \cdot \cos(q_3) \end{bmatrix} \quad (4.18.)$$

## 4.2. Proračun inverzne kinematike

Da bi se robotom moglo upravljati, za zadane točke u prostoru definirane pripadajućim vektorom konfiguracije hvataljke  $p$  potrebno je pronaći pripadajuće vrijednosti varijabli zglobova, koje se nalaze u vektoru zglobova  $q$ .

Do rješenja inverznog kinematičkog problema moguće je doći analitički ili iterativnim numeričkim postupcima. Analitičko rješenje je složenije jer ne postoji sustavan postupak rješavanja kao kod direktnog kinematičkog problema. Ipak, do rješenja se može doći izravnim proračunom pa se ne javljaju problemi neprepoznavanja singularnih stanja robota i moguće divergencije postupka rješavanja. Zbog toga će se koristiti analitički pristup.

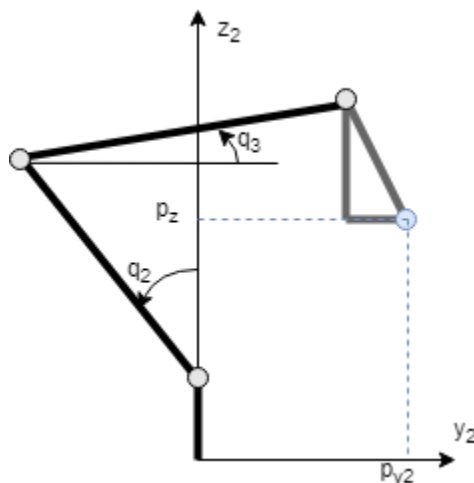


**Slika 28. Shematski prikaz položaja hvataljke u prostoru**

Sa slike 28 je odmah vidljivo da se vrijednost prvog zgloba  $q_1$  može jednostavno izračunati iz ulaznih vrijednosti.

$$q_1 = -\arctan\left(\frac{p_x}{p_y}\right) \quad (4.19.)$$

Negativan predznak u izrazu (4.19) je tu zbog dosljednosti desnokretnog pravokutnog kartezijevog koordinatnog sustava. Zbog toga što se izbacivanjem prvog zakreta ostatak robota nalazi u jednoj ravnini, transformacijom koordinatnog sustava se problem u nastavku može promatrati kao dvodimenzijski.

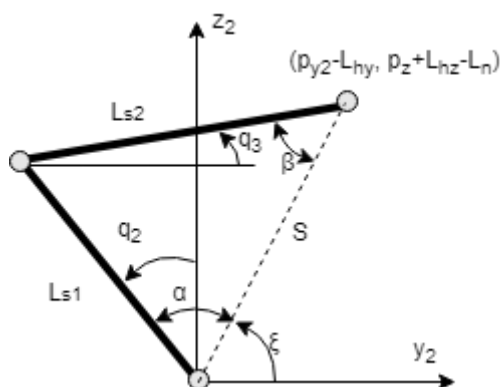


**Slika 29. Planarni shematski prikaz položaja hvataljke**

U tom slučaju se koordinata  $p_z$  ne mijenja, a koordinata  $p_{y2}$  se računa preko Pitagorinog poučka

$$p_{y2} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (4.20.)$$

Zbog MDP se analiza može dodatno pojednostaviti tako da se gleda samo razlika koordinata. Tim pojednostavljenjem se dobije trokut s dvije poznate točke i dvije poznate duljine.



**Slika 30. Trokut za analizu unutarnjih koordinata**

Treća duljnina  $S$  se također izračunava preko Pitagorinog poučka

$$S = \sqrt{(p_{y2} - L_{hy})^2 + (p_z + L_{hz} - L_n)^2} \quad (4.21.)$$

Poznavajući sve tri stranice, pomoćni kutevi  $\alpha$  i  $\beta$  se izračunavaju preko kosinusovog poučka.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L_{s2}^2 - L_{s1}^2 - S^2}{-2L_{s1}S}\right) \quad (4.22.)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_{s1}^2 - L_{s2}^2 - s^2}{-2L_{s2}s}\right) \quad (4.23.)$$

Za određivanje preostalih unutarnjih vrijednosti je potreban još kut  $\xi$

$$\xi = \arctg\left(\frac{p_z + L_{hz} - L_n}{p_{y2} - L_{hy}}\right) \quad (4.24.)$$

Unutarnje vrijednosti glase

$$q_2 = \alpha + \xi - \frac{\pi}{2} \quad (4.25.)$$

$$q_3 = \xi - \beta \quad (4.26.)$$

Iz toga se može izraziti vektor unutarnjih koordinata

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arctan\left(\frac{p_x}{p_y}\right) \\ \alpha + \xi - \frac{\pi}{2} \\ \xi - \beta \end{bmatrix} \quad (4.27.)$$

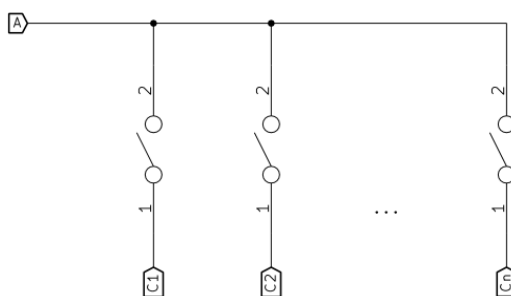
Da bi se kod implementacije izbjegli numerički problemi dijeljenja s nulom kod traženja vrijednosti funkcija, umjesto obične  $\text{atan}(y/x)$  funkcije treba koristiti  $\text{atan2}(y,x)$  funkciju. Ona vraća dobre rezultate za sva četiri kvadranta, kao i za točke na y osi.

## 5. MJERNI UREĐAJI I IMPLEMENTACIJA

Potrebno je odabrati adekvatne mjerne uređaje za prepoznavanje figura. Zamišljeno je da bi se figure prepoznavale na način se senzori postave ispod polja i na taj način prepoznavanju figure. Kako šah uvijek počinje na isti način, mjerenjem promjena pozicija figura je moguće znati poziciju svake figure u svakom trenutku. U obzir je uzeto cijeli niz senzora s različitim načinom rada. Pošto se na ploči nalazi 64 polje, potrebno je postaviti i 64 senzora. To znači da je cijena svakog senzora od velike važnosti. Najjeftinija opcije je koristiti reed prekidače. Reed prekidači su električni prekidači upravljani pomoću magnetskog polja. Sastoje se od para kontakata koji su smješteni u hermetički zatvorenu staklenu epruvetu. Rade na način da se postavljanjem senzora u magnetsko polje kontakti stisnu što omogućuje protok struje. Kontakti su posrebrjeni da bi se smanjio otpor spoja. Ako se ispod svakog polja stavi jedan takav reed prekidač, a ispod svake figure se stoji magnet, onda će reed prekidači biti zatvoreni na svim poljima na kojima se nalaze figure. Čitanjem stanja releja se može dobiti podatak o razmještanju figura.

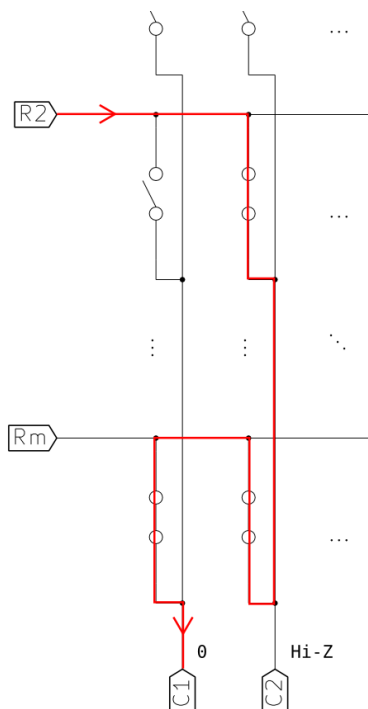
### 5.1. Shema spajanja komponenti

Projektiranje sustava prepoznavanja figura kreće osmišljavanjem načina na koji će se 64 senzora spojiti na upravljačku jedinicu. Dva su načina najčešće primjenjivana, a to su korištenje multipleksora i povezivanje senzora na tzv. matrični način. Drugi način zahtijeva upotrebu više pinova od kojih bi 8 bilo ulaznih, a 8 izlaznih. Pošto Raspberry Pi ima dovoljno GPIO (General Purpose Input/Output) pinova, može se iskoristiti taj način jer on ne zahtijeva korištenje dodatne komponente. Da bi se napravila shema, potrebno je prvo pogledati kako funkcionira matrično povezivanje senzora. Generalna ideja je da je više senzora povezano na istu granu pod naponom, a svaki senzor vodi na jedan ulazni pin. Senzori koji su upaljeni će spojiti ulaz s granom pod naponom. Čitanjem ulaza svakog pojedinog ulaza daje podatak o tome koji prekidači su zatvoreni.



**Slika 31. Više prekidača, jedan izlaz**

Sličan je i princip rada s više ulaza, uz tu razliku da bi se čitanje stanja na ulazim provodi onoliko puta koliko ima izlaznih grana, u ovom slučaju 8, gdje se svakim provjeravanjem pali drugi izlaz. Problem koji se javlja kod takvog načina rada je tzv. ghosting, i prikazan je na slici 32. Naime, ako se uključuje jedna izlazna grana i ako je pritisnuto više tipki od jednom, može se dogoditi da tok signala nije takav kakav je zamišljen, što bi davalo krive rezultate o stanju prekidača.



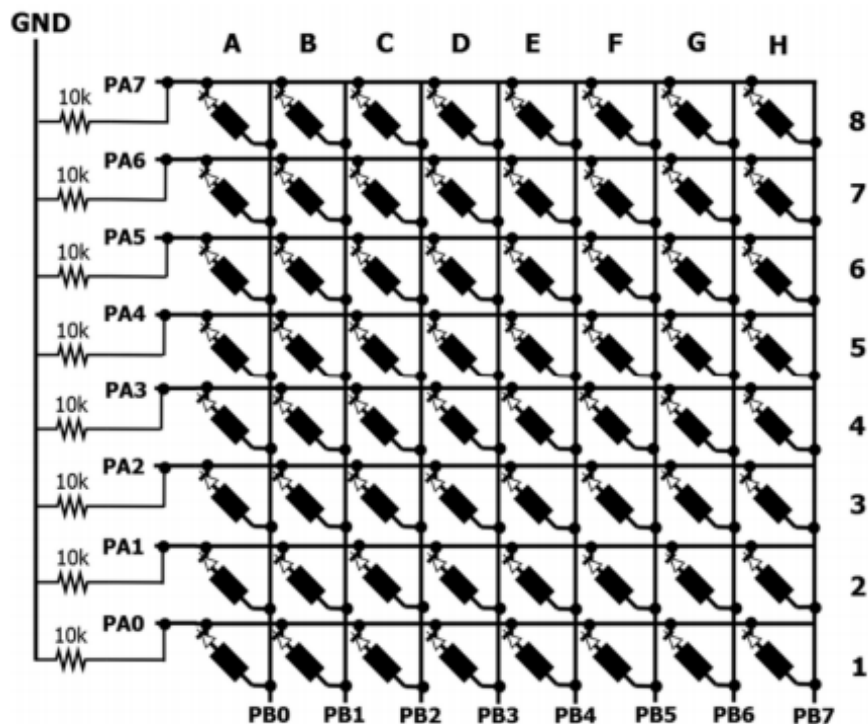
**Slika 32. Primjer ghosting-a kod matričnog spajanja prekidača**

Taj se problem jednostavno rješava dodavanjem diode serijski sa svakim prekidačem. Kako dioda pušta struju samo u jednom smjeru, ne mogu se dogoditi nepriželjkivani rezultati.



Osim dioda, potrebno je dodati i pull-down otpornike između svake ulazne grane i GND. Time je osigurano da će u svakom trenutku stanje na ulazi biti ili 1 ili 0.

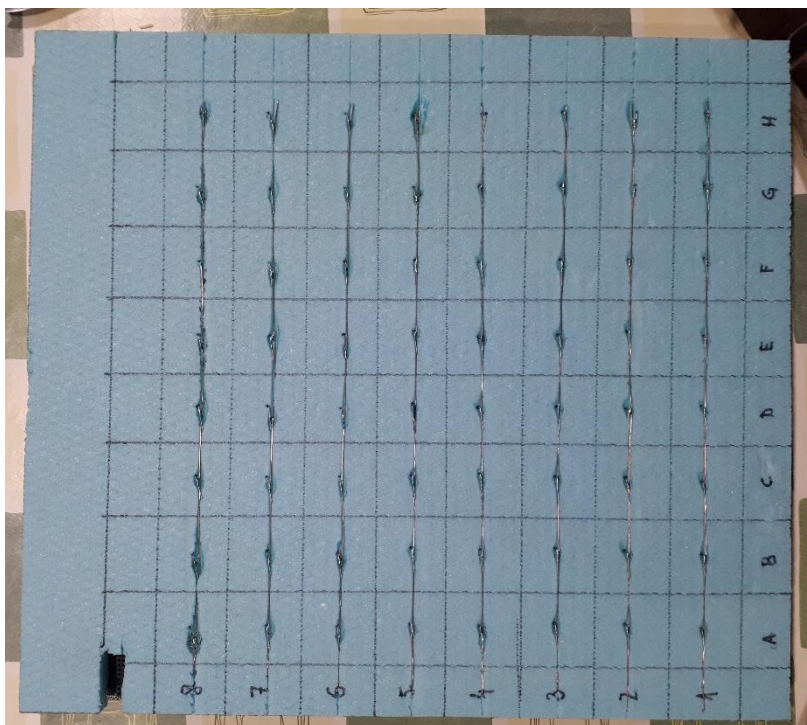
Gotova shema koja će se koristiti za izradu ploče senzora je prikazana na slici



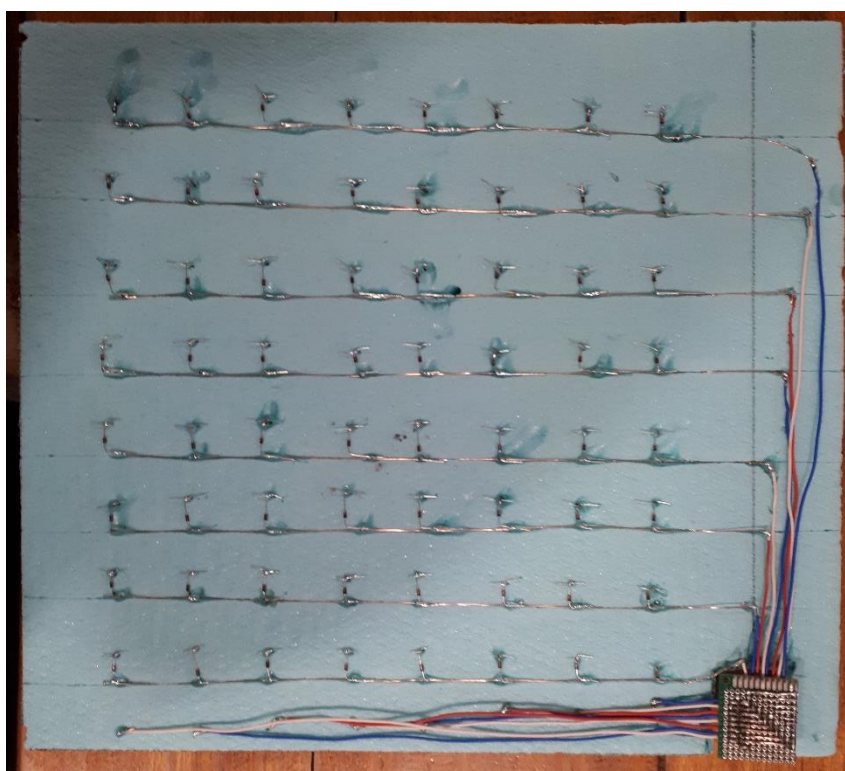
Slika 33. Shema matričnog povezivanja senzora.

## 5.2. Izrada ploče sa sensorima

Izrada je počela tako da su se prvo odabrali magneti i orijentacija reed prekidača. Na izboru su bila tri magneta različitih veličina i snage. Najmanji magnet nije uspijevaao uključiti reed prekidač na cijelom polju. Najveći magnet je bio toliko snažan da je previše privlačio figure na poljima. Srednji magnet je bio taman toliko snažan da omogućuje uključenje prekidača na cijelom polju, a da si magnetska polja međusobno ne smetaju. Najbolja orijentacija reed prekidača se pokazala ona koja je radijalno paralelna s magnetima. Zato se odlučilo da će se ti senzori montirati u pjenastu ploču koja će ih držati okomitim i na mjestu. Na istoj ploči su zalemljene i sve ostale komponente i napravljena je pločica koja sadrži headere za jednostavno povezivanje sa upravljačkom jedinicom. Gotova ploča je prikazana na slikama 34 i 35.



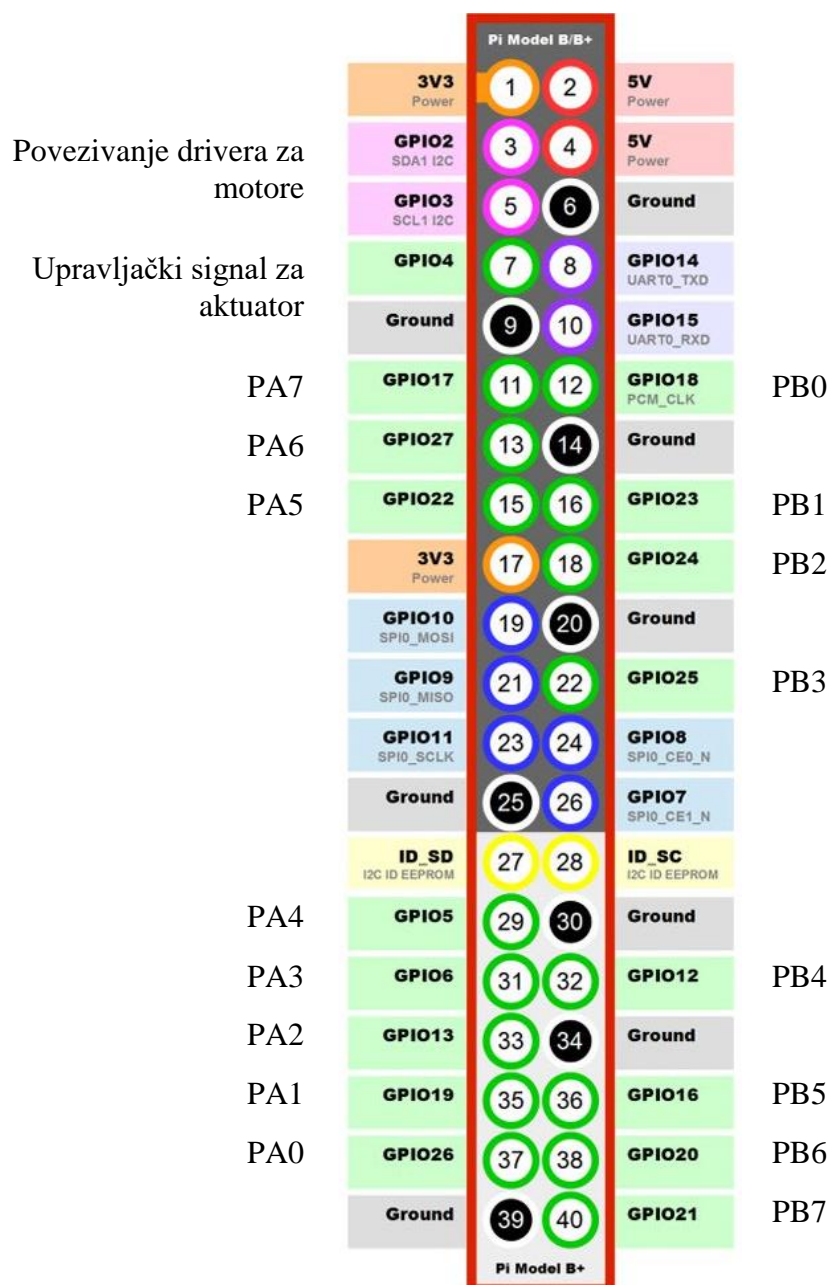
**Slika 34. Gornja strana ploče sa senzorima**



**Slika 35. Donja strana ploče sa senzorima**

### 5.3. Implementacija

Da bi se ploča sa senzorima povezala s upravljačkom jedinicom Raspberry Pi, potrebno je samo prikazati način spajanja na pinove prema slici 36.



Slika 36. Spajanje komponenti na upravljačku jedinicu

## 6. ZAKLJUČAK

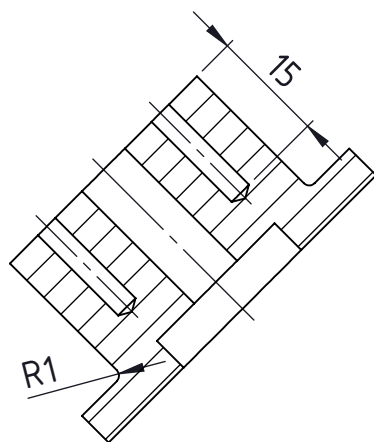
Projektiranje dinamičke konstrukcije kao što je robotska ruka zahtijeva veliku pozornost pri konstruiranju i potrebu za iterativnim pristupom konstruiranja zbog često nepredvidljivog položaja dijelova. Projekt povezuje gotovo sva područja strojarstva što zahtijeva primjenu znanja stečenog tijekom studiranja, ali i puno samostalnog učenja i rada. Dimenzioniranje ovakvog sustava kod kojeg su gotove sve veličine međusobno zavisne zahtijeva definiranje modela na način da se dimenzije mogu jednostavno promijeniti bez da to utječe na ostatak konstrukcije. Da bi se dobio gotov proizvod, potrebno je još implementirati upravljačke algoritme i logiku igranja šaha što nije obrađivano u sklopu ovog rada, ali ostvarene su sve potrebne predispozicije.

## LITERATURA

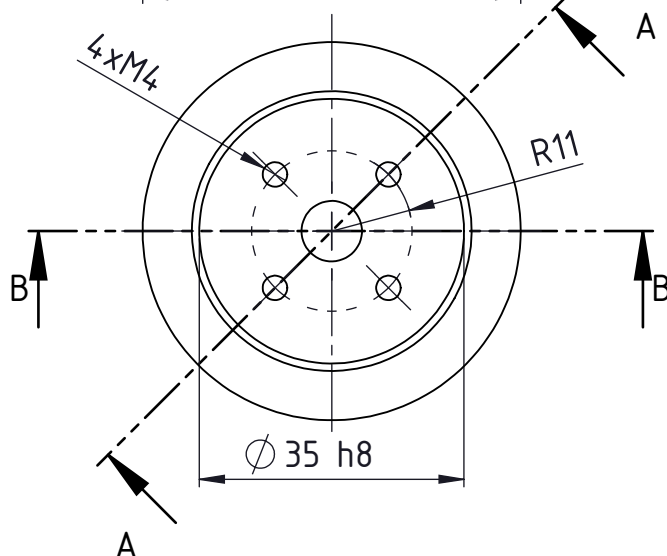
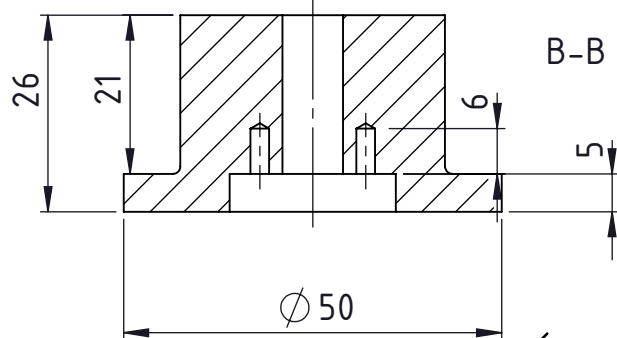
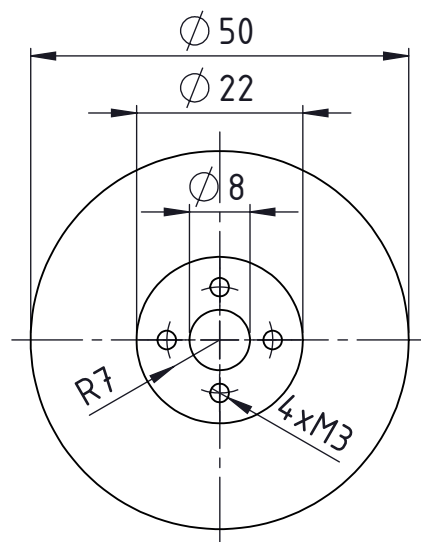
- [1] T. Šurina, M. Crneković: Industrijski roboti, Školska knjiga Zagreb, 1990
- [2] Z. Kovačić, S. Bogdan, V. Krajči: Osnove robotike, Graphis Zagreb, 2002
- [3] F. Matejiček: Kinetika sa zbirkom zadataka, 3. popravljeno izdanje, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2014
- [4] K. Wang, T. K. Lien: The structure design and kinematics of a robot manipulator, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 5, No. 2/3, pp. 153-158, 1989
- [5] P. E. Sandrin: Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw-Hill, 2003
- [6] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk: Robot grippers, Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004
- [7] Brian, James: Automatic Chessboard ESE 350: Final Project, Spring 2011
- [8] <http://www.yuchao.us/2017/09/robot-nd-a2-kinematics.html>
- [9] <http://www.robot-welding.com/robots.htm>
- [10] <http://www.robotoid.com/>
- [11] <http://blog.komar.be/how-to-make-a-keyboard-the-matrix/>
- [12] <https://www.raspberrypi.org/>


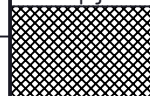

## **PRILOZI**

- I. Tehnička dokumentacija za „Unutarnji dio glavnog nosača“
- II. Tehnička dokumentacija za „Vanjski dio glavnog nosača“



A-A



Broj naziva - code		Projektirao	9.11.2017.	Ime i prezime	Leon Malnar	Potpis	 FSB Zagreb	
		Razradio	9.11.2017.	Leon Malnar				
		Crtao	9.11.2017.	Leon Malnar				
		Pregledao						
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:			
Ø 35 h8	0 -0,039							
		Napomena:					Kopija	
		Materijal: Al 1060		Masa: 0,07 kg				
				Naziv: UNUTARNJI DIO GLAVNOG NOSAČA		Pozicija:		
		Mjerilo originala				Format: A4		
		M 1:1				Listova: 1		
				Crtež broj: 1		List: 1		

